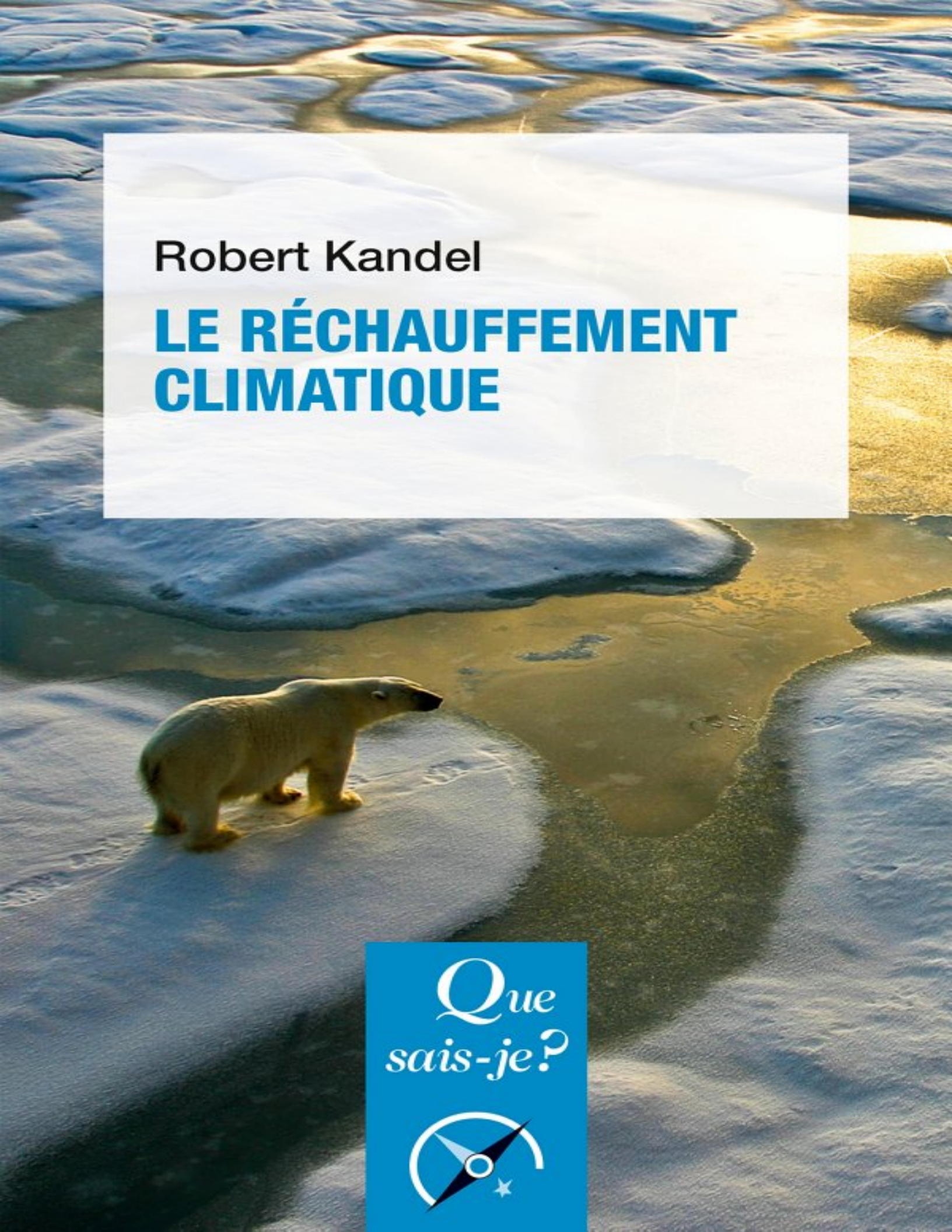




Robert Kandel

LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

*Que
sais-je?*



VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Robert Kandel

LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

*Cinquième édition mise à jour
12^e mille*

*Que
sais-je?*

À lire également en *Que sais-je ?*

COLLECTION FONDÉE PAR PAUL ANGOULVENT

Jacqueline Morand-Deville, *Le Droit de l'environnement*, n° 2334.

Jacques Vernier, *L'Environnement*, n° 2667.

Jacques Vernier, *Les Énergies renouvelables*, n° 3240.

Sylvie Brunel, *Le Développement durable*, n° 3719.

William Dab, *Santé et environnement*, n° 3771.

Pierre Lascoumes, *Action publique et environnement*, n° 3968.

ISBN 978-2-13-081704-8

ISSN 0768-0066

Dépôt légal – 1^{re} édition : 2002

5^e édition mise à jour : 2019, mars

© Presses Universitaires de France / Humensis, 2019
170 *bis*, boulevard du Montparnasse, 75014 Paris

Ce document numérique a été réalisé par [Nord Compo](#).

Introduction

I. – Le réchauffement climatique, le problème du ^{xxi}^e siècle ?

Depuis une quarantaine d'années, et de plus en plus souvent, le « réchauffement global » fait la une de l'actualité. Lorsqu'on montre sur les écrans la désolation que laisse chaque catastrophe météorologique, on s'empresse d'accuser le réchauffement, comme s'il n'y avait pas eu de désastres autrefois. Mais qui peut sérieusement prétendre que le réchauffement – au demeurant bien réel – a joué un rôle significatif dans l'histoire extraordinaire et terrible du ^{xx}^e siècle ? La vie des gens a changé, non pas à cause du réchauffement, mais plutôt en fonction des nouvelles technologies de production industrielle, de transport, et de télécommunication, des progrès de la santé publique et de la médecine, du développement économique et des guerres. Pourtant, le réchauffement global pourrait bien devenir, pour une part croissante des habitants de la Terre, *le problème du ^{xxi}^e siècle* : faute d'action forte et collective, les conséquences du changement climatique s'intensifient et agissent comme de l'huile sur le feu à l'égard de nombreuses autres crises contemporaines.

Les scientifiques ont soulevé le problème avant 1900 et l'ont revu de plus en plus souvent à partir de 1972. Sur le plan de la diplomatie, si l'on a bien parlé du risque de réchauffement lors de la première conférence mondiale sur le climat à Genève en 1979, c'était pour conclure qu'il était encore trop tôt pour convoquer une réunion au niveau ministériel. Cela a changé à partir des années 1980, avec la signature de la convention-cadre de l'ONU sur le changement climatique lors du « sommet de la Terre » à Rio en 1992, la négociation du Protocole de Kyoto fin 1997, et les nombreuses réunions internationales qui ont suivi. Saura-t-on respecter les engagements pris avec l'Accord de Paris de 2015 et réaffirmés à Katowice (Pologne) fin 2018 ?

Sur le plan de l'histoire naturelle, l'environnement a subi de nombreux bouleversements au cours du xx^e siècle, mais les changements climatiques ont été de peu de poids en comparaison de l'emprise accrue et directe des activités humaines sur l'environnement : croissance de la population humaine, déforestation tropicale et extension des surfaces consacrées à l'agriculture et à l'élevage, augmentation des populations de bovins et autres ruminants, grossissement démesuré des conurbations et des zones industrielles, intensification insoutenable de la pêche industrielle.

Les choses se passent autrement depuis quelques décennies. Nous, humains, altérons la composition de l'atmosphère de la planète tout entière. Les gaz que nous ajoutons de plus en plus vite à l'atmosphère agissent, nous le savons, dans le sens d'un réchauffement de la surface du globe et des basses couches de l'atmosphère. Nous allons donc vers un *réchauffement global*. Cette mauvaise traduction du terme anglais *global warming* représente peut-être mieux que le terme anglais lui-même ce que nous craignons : globalement, un réchauffement à la surface de la Terre,

mais pas nécessairement, et surtout pas uniformément, sur *toute* sa surface. Ici ou là, on peut même s'attendre à un refroidissement et, dans certaines régions, à un réchauffement beaucoup plus fort et plus dangereux.

Selon les projections du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, établi par l'ONU en 1988 (GIEC ; en anglais, IPCC pour *Intergovernmental Panel on Climate Change*), l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe, d'ici l'an 2100, va se situer entre 1 et 6 °C. Ces projections correspondent à différents *scénarios* d'émissions de gaz à effet de serre (GES), et à des estimations du réchauffement pour ces scénarios à partir de différents modèles du climat. Pour les scénarios d'émissions *modérées* (fig. 1), elles se situent entre 1 et 4 °C. Or, un réchauffement de 4 °C ou plus serait de même grandeur que le réchauffement qui a mis fin à la dernière période glaciaire, changement qui a modifié radicalement la carte du monde. Mais, alors que le changement naturel a mis quelques millénaires à se faire, il s'agit maintenant d'un réchauffement du même ordre en un seul siècle : un véritable choc climatique.

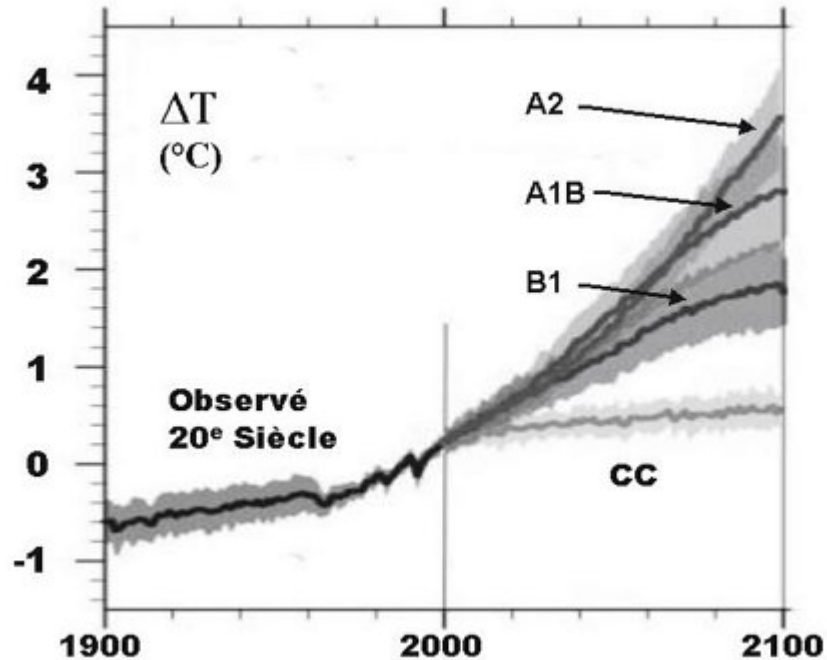


Fig. 1. – Les projections du GIEC du réchauffement ΔT (augmentation de la température moyenne à la surface du globe par rapport à la moyenne de la période 1980-1999), à gauche pour l'évolution de la composition atmosphérique observée au xx^e siècle, à droite pour trois scénarios A2, A1B, et B1 d'émissions progressivement modérées au cours du xxi^e siècle ainsi que le scénario (déjà contredit par les faits) de composition atmosphérique constante à partir de l'an 2000. Les zones en grisé représentent les différences entre les simulations des différents modèles climatiques utilisés (une vingtaine) pour chaque scénario et chaque période. Aujourd'hui, de nombreux spécialistes estiment qu'un seuil de 1,5 °C s'impose pour éviter l'entrée dans une zone de changements climatiques dangereux. Pour des projections ΔT pour d'autres scénarios d'émissions, voir le rapport spécial du GIEC et www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/

De quoi l'avenir sera-t-il fait ? Le cours réel de nos émissions de gaz à effet de serre dépendra de l'évolution des économies des pays aujourd'hui riches et des pays émergents, comme il dépendra des choix politiques et de l'essor de nouvelles technologies. Toutefois, si

nous ne changeons pas de cap, si nous ne parvenons pas à réduire nos émissions de GES, l'altération anthropique de l'atmosphère dominera de plus en plus les variations naturelles. Relayée par les réactions de la nature, cette altération risque de nous entraîner vers un changement climatique de grande ampleur d'ici l'an 2100. Ce sera là le grand problème auquel nous, nos enfants, et nos petits-enfants, auront à faire face au cours de ce ^{xxi}^e siècle.

II. – Réalités et risques

Les uns crient à la catastrophe planétaire si nous persévérons dans nos modes de vie et de production, les autres à la catastrophe économique si nous cherchons tant soit peu à les modifier. Qui faut-il croire ? Nous pouvons dégager un certain nombre de réalités, de faits bien établis, nous pouvons identifier de multiples risques réels, risques qui s'échelonnent de la quasi-certitude à la possibilité cauchemardesque. Il ne s'agit pas d'un exercice purement spéculatif, car nous savons que nos actions affectent déjà la planète dans son ensemble, et que nos choix d'agir (ou de ne pas agir) au cours des prochaines années vont en partie façonner notre avenir. Nous restons entourés d'incertitudes, et nous ne pourrions guère espérer les éliminer toutes, même si nous pouvons compter sur de fortes avancées dans nos connaissances. Il faut néanmoins donner un contenu concret à ce qui est appelé le « principe de précaution », peser le certain, le probable, et l'improbable, savoir rejeter les fantasmes sans pour autant écarter les éventualités que nous estimons peu probables mais totalement inacceptables.

1. La transformation de l'atmosphère. – Dans la première partie de cet ouvrage, nous exposerons la réalité de la transformation de l'atmosphère planétaire par les actions humaines depuis l'avènement de l'ère industrielle, et nous décrirons comment cette transformation diffère des variations naturelles du passé. Nous enquêterons sur les risques d'une transformation plus importante de l'atmosphère au cours des prochaines décennies du xxi^{e} siècle. Nous savons aujourd'hui que les activités humaines enrichissent l'atmosphère en plusieurs gaz à effet de serre, non seulement le gaz carbonique (CO_2), mais aussi le méthane (CH_4), et bien d'autres. Mais nos modifications de l'atmosphère ne se limitent pas à cet enrichissement. Différentes formes de pollution modifient la quantité et la répartition de particules solides et liquides en suspension dans l'atmosphère (les *aérosols*), affectant directement et indirectement la disposition de l'énergie solaire entre l'atmosphère et la surface de la planète, agissant ici et là, mais pas partout, dans le sens d'un refroidissement de la surface par intensification de ce que j'appelle l'effet *parasol*. Une stabilisation avant l'an 2100 de la quantité de GES dans l'atmosphère paraît improbable mais non impossible. En revanche, on peut facilement imaginer – et réaliser – une réduction de la quantité d'aérosols anthropiques dans l'atmosphère, où par *anthropique* (par opposition au *naturel*), on désigne tout ce qui découle directement ou indirectement des activités humaines.

2. L'atmosphère contrôle le climat. – Nous avons évoqué l'effet de serre et l'effet parasol, encore faut-il les définir. Dans la deuxième partie de cet ouvrage nous développerons ces concepts, qui se réfèrent à une représentation schématisée des processus qui gouvernent le climat. Nous savons que le Soleil chauffe la Terre, et que toute variation significative du Soleil peut et doit changer le

climat. Cependant, l'atmosphère, par l'effet parasol, détermine quelle fraction de l'irradiation solaire est transformée en chaleur et, par l'effet de serre, contrôle comment cette chaleur s'évacue vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge thermique. Un modèle très simple (à dimension zéro !) du système climatique permet d'identifier les facteurs *externes* de contrôle du climat, et de définir les termes de *forçage* du changement, forçages aussi bien naturels qu'anthropiques, directs qu'indirects. On ne saurait cependant se satisfaire de ce schéma caricatural où ne figurent que les flux énergétiques en moyenne globale. Il faut commencer par introduire le cycle de l'eau, aspect essentiel des climats, et considérer ce que l'on appelle, encore en simplifiant, les *rétroactions*. Il faut aussi reconnaître que le système climatique possède une variabilité interne, indépendante des forçages externes. Cette variabilité résulte en grande partie des couplages imparfaits et non synchrones entre l'atmosphère et les autres composants du système climatique, surtout l'hydrosphère (océans et autres masses d'eau liquide) et la cryosphère (glace et neige), et de la répartition dissymétrique de continents sur le globe inégalement éclairé. Ce n'est que depuis la révolution du calcul numérique qu'on peut sérieusement essayer de calculer l'évolution dans le temps de ce système complexe à trois dimensions.

3. Le climat se réchauffe et se réchauffera. – Dans la troisième partie, nous aborderons la climatologie au sens classique, à savoir les observations qui permettent de définir les climats et de détecter les changements climatiques. Malgré les nombreuses difficultés – lacunes dans les observations historiques, en particulier dans la couverture du globe et avant le xx^e siècle, évolution des techniques de mesure, perturbations par des phénomènes locaux –,

la réalité du réchauffement depuis la fin du xix^{e} siècle est bien établie. Ce réchauffement, quoique faible comparé aux alternances entre périodes glaciaires et interglaciaires, se démarque nettement des variations du dernier millénaire. Pour les autres aspects du climat, précipitations, fréquence de tempêtes violentes ou de sécheresses prolongées, des variations importantes existent à différentes échelles d'espace et de temps, mais les insuffisances des données historiques font qu'on ne peut guère en tirer une évolution globale. Pour bien comprendre le fonctionnement du système climatique d'aujourd'hui, pour tenter de prédire son évolution en réponse aux forçages actuels et futurs de changement, il faut non seulement mieux calculer, mais aussi améliorer et compléter les observations de tous les composants du système, sur toute la surface du globe, en faisant largement appel à l'observation spatiale de l'atmosphère et de la surface, comme au sondage des profondeurs de la mer. Les outils (plates-formes d'observation spatiale, réseaux de bouées équipées d'instruments scientifiques) véritablement adéquats n'existent pas encore au complet, et, en ce sens, la climatologie observationnelle se décline surtout au futur. Mais en même temps, la paléoclimatologie avance à grands pas, et cet affinement de nos connaissances des climats passés, parfois radicalement différents du climat présent, et de changements climatiques plus ou moins rapides, met à l'épreuve de la vérité les modèles climatiques et les simulations de changement climatique en réponse à tel ou tel scénario de forçage. Quelle sera l'ampleur du réchauffement global, et comment se manifestera-t-il ? Quels seront en particulier les changements dans le cycle de l'eau ?

III. – Le climat et la politique

Certains choix de développement économique paraissent devoir conduire le monde à un réchauffement radical avant l'an 2100, traçant de nouvelles côtes et dessinant de nouvelles cartes de la répartition des pluies, de l'extension des déserts, de la fréquence des sécheresses, du risque de tempêtes sévères. Si nous estimons que les coûts – pour l'environnement des hommes et pour la biodiversité autant que pour l'économie mondiale – sont inacceptables, pouvons-nous changer de cap ? Nous traiterons cette question dans la dernière partie de l'ouvrage, avec l'historique de l'irruption de la question climatique sur la scène politique internationale, une analyse des accords et déclarations d'intention qui ont suivi le Protocole de Kyoto, et quelques interrogations sur l'avenir. Il s'agit en fin de compte de savoir si les activités humaines, produisant aujourd'hui des forçages de changement climatique global et déclenchant des rétroactions physiques et biogéochimiques, peuvent également comporter des mécanismes de rétroaction de l'intelligence, permettant de choisir un avenir moins éprouvant que celui vers lequel l'humanité semble diriger la planète.

CHAPITRE PREMIER

La transformation de l'atmosphère planétaire

I. – La mesure du changement

1. **Les mesures du Mauna Loa.** – Dès 1895, le chimiste suédois Svante Arrhenius remarque que la combustion croissante de carburants fossiles (charbon, gaz et pétrole) doit nécessairement faire croître la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, et il formule l'hypothèse que cela renforcera l'effet de serre, entraînant un réchauffement à la surface du globe. L'observation directe confirme l'enrichissement de l'atmosphère en CO_2 dès les années 1970. Au cours de l'Année géophysique internationale (1957-1958), l'Américain Charles David Keeling commence sa longue série de mesures systématiques et précises de la concentration atmosphérique de ce gaz. Les instruments, installés à 3 400 m d'altitude sur un ancien champ de lave ($19^\circ 32' \text{N}$, $155^\circ 35' \text{W}$) du Mauna Loa (volcan relativement peu actif de la grande île de Hawaï), observent des masses d'air qui la plupart du temps sont des échantillons représentatifs de l'ensemble de l'atmosphère de la Terre. Au bout de quelques années, le résultat est clair : le CO_2

atmosphérique croît systématiquement (fig. 2). En 1958, sa concentration moyenne sur l'année valait 315 parties par million (ppm). En 1974, elle dépasse 330 ppm. On constate bien une oscillation annuelle : le CO₂ diminue de plusieurs ppm au cours de l'été de l'hémisphère Nord, et augmente au cours de l'hiver. Cette oscillation résulte de la distribution dissymétrique de la surface continentale sur le globe. Pendant la saison de croissance de la végétation dans la zone tempérée de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord, la photosynthèse retire du CO₂ à l'atmosphère pour fabriquer de la matière organique et de l'oxygène ; le reste de l'année, quand la respiration domine, elle restitue la quasi-totalité de ce CO₂ à l'atmosphère. Cependant, depuis les années 1950, l'augmentation du CO₂ atmosphérique, d'une décennie à la suivante, dépasse l'amplitude de son cycle annuel. Dès 2001, la concentration atmosphérique du CO₂ dépasse les 370 ppm ; en 2018, 405 ppm ! Il s'agit là de valeurs moyennes pour *toute* l'atmosphère de la planète.

2. Le CO₂ avant 1957 et partout sur la Terre. – L'ampleur et la rapidité de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂, 5 % d'augmentation en valeur relative en moins de vingt ans, confirment dès 1975 la vraisemblance de l'hypothèse d'un doublement prochain de l'abondance de ce gaz, stimulant des efforts pour compléter les observations de Keeling. D'anciennes analyses de la composition atmosphérique estiment le CO₂ à 290 ppm en 1900. De l'analyse de bulles d'air piégées dans les couches de glace – les neiges d'antan –, on déduit une teneur proche de 277 ppm en 1750. La quantité du CO₂ dans l'atmosphère aura donc augmenté de plus d'un quart au cours du xx^e siècle, de plus d'un tiers depuis le début de la Révolution industrielle.

La transformation de la composition atmosphérique révélée à Mauna Loa a conduit à l'établissement de nombreuses autres stations de mesure à travers le monde, depuis Alert (Canada) à 800 km du pôle Nord, et Barrow (Alaska) au bord de l'océan Arctique, à la station scientifique américaine du pôle Sud, avec une station française sur l'île d'Amsterdam (37°52'S, 77°32'E) dans le sud de l'océan Indien. Dans toutes ces stations, les mesures confirment la réalité de la croissance régulière de la teneur de CO₂. L'amplitude et la phase de l'oscillation annuelle diffèrent d'une station à l'autre, comme on peut s'y attendre, en fonction de la latitude et de la situation par rapport aux surfaces à couvert végétal.

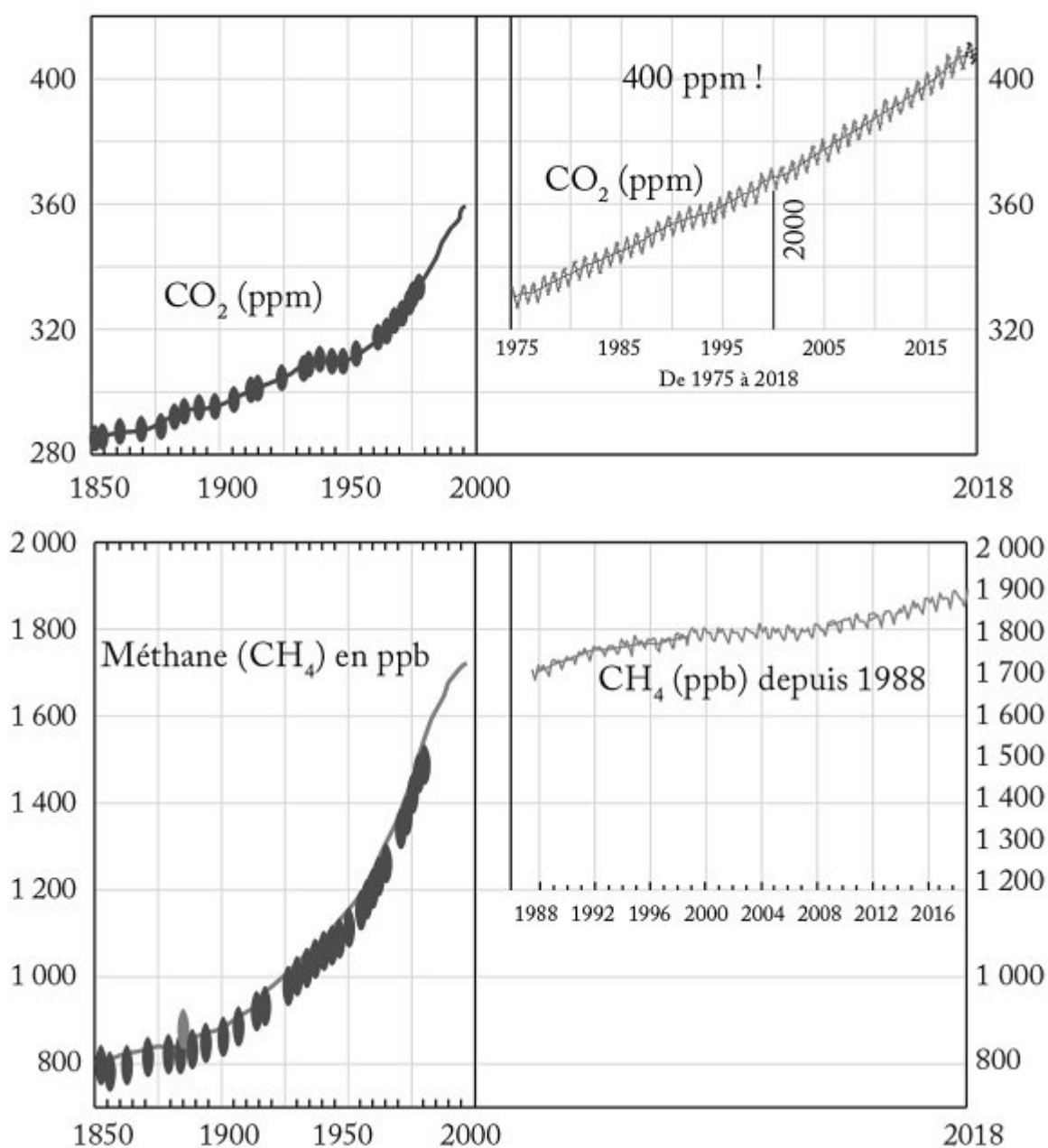


Fig. 2. – Évolution des concentrations atmosphériques de deux gaz à effet de serre (GES) directement affectés par les activités humaines, depuis 1850 (à gauche), plus récemment (à droite). En haut, le dioxyde de carbone (CO_2) ; en bas, le méthane (CH_4). On donne les concentrations en parties par million (ppm) pour le CO_2 , en parties par milliard (ppb : parts per billion) pour le CH_4 . Mesures faites à l'observatoire du Mauna Loa (Hawaï).

3. La vapeur d'eau. – À l'état de gaz, les molécules H_2O exercent un effet de serre naturel bien plus fort que celui du CO_2 . Or, la combustion d'hydrocarbures extraits du sous-sol correspond bien à une production de molécules H_2O comme de CO_2 . Toutefois, alors que les émissions croissantes de CO_2 font effectivement monter la quantité de CO_2 dans toute l'atmosphère, l'effet *direct* des émissions d' H_2O reste négligeable par rapport aux flux naturels, 100 000 fois plus forts, du cycle de l'eau. Bien plus importante est la croissance de l'humidité atmosphérique avec le réchauffement de l'atmosphère, cette « rétroaction vapeur d'eau » amplifiant le changement climatique. Nous la discuterons plus en détail dans la section III. 2 du [chapitre II](#). Cette croissance est bien observée par les instruments des satellites, malgré les difficultés liées à la très forte variabilité spatiale et temporelle de la teneur atmosphérique de vapeur d'eau.

4. Les autres gaz à effet de serre. – La surveillance ne se limite pas au dioxyde de carbone ; les scientifiques s'intéressent à plusieurs autres gaz moins abondants révélant des modifications de la chimie de l'atmosphère. Tout gaz constitué de molécules polyatomiques (molécules faites de trois atomes ou plus) peut contribuer à l'effet de serre. Il s'agit notamment du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O). Comme pour le CO_2 , leurs concentrations atmosphériques ont augmenté. Comparant les mesures directes des dernières années aux déterminations à partir des glaces des deux derniers siècles, on constate que le méthane a plus que doublé, passant de 800 ppb en 1850 à presque 1900 ppb aujourd'hui ([fig. 2](#)). La concentration du protoxyde d'azote (N_2O), inférieure à 280 ppb en 1850, a dépassé 330 ppb en 2018.

5. Les chlorofluorocarbures et l'ozone. – On doit aussi mentionner les différents gaz de la famille des chlorofluorocarbures (CFC), créations industrielles qui n'existaient pas avant 1938. Ces molécules, qui ont la même structure que le CH_4 mais avec, autour de l'atome de carbone, des atomes de chlore et de fluor à la place de ceux d'hydrogène, ont une très longue durée de vie. Atteignant la stratosphère, elles participent à un cycle de destruction catalytique de l'ozone (O_3), révélée par la découverte en 1985 du « trou » de l'ozone au-dessus de l'Antarctique. L'implication des CFC dans cette destruction a conduit à l'adoption en 1987 du Protocole de Montréal, mettant fin à leur production. On constate déjà un plafonnement, voire une légère décroissance, de la concentration atmosphérique de certains des CFC. Toutefois, ils ne disparaîtront pas de sitôt, car il en existe encore d'importantes quantités dans les circuits de réfrigération et de climatisation, qui finissent trop souvent dans l'atmosphère lorsque les équipements achèvent leur durée de vie. L'atmosphère contiendra encore pendant plusieurs décennies des CFC. Pendant cette période, le trou de l'ozone se creusera chaque printemps au-dessus de l'Antarctique et le « mitage » de l'ozone au-dessus de l'Arctique continuera. On cherche à préserver l'ozone de la stratosphère parce qu'il absorbe le rayonnement ultraviolet du Soleil et fait ainsi écran pour la vie à l'air libre. On commence à y parvenir. Cependant, dans l'air que nous *respirons*, l'ozone, un puissant oxydant, constitue un *polluant* nocif pour les animaux comme pour la végétation. En outre, l'ozone contribue à l'effet de serre, et sa concentration a augmenté de manière significative non seulement près des villes polluées mais aussi sur des régions étendues.

6. Les autres changements : la fumée noire. – L'augmentation du CO₂ au cours du XXI^e siècle n'aura que peu de conséquences directes pour la santé, sauf par l'intermédiaire des changements climatiques qu'elle entraîne. Le CO₂ étant matière première essentielle de la photosynthèse, son augmentation favorise la croissance des plantes. Elle la favorise, certes, mais cette croissance dépend bien plus fortement encore de la disponibilité d'éléments nutritifs et de celle de l'eau, qui, comme les températures ambiantes, changent avec le climat. S'il faut craindre, et chercher à empêcher, une montée trop rapide et trop forte de la concentration du CO₂, c'est à cause de ses effets sur les climats. En même temps, les activités industrielles donnent lieu à des émissions d'autres gaz et particules qui agressent plus directement les sens et la santé, de véritables pollutions. À part les GES, nos actions modifient la quantité de particules en suspension dans l'atmosphère (les aérosols), affectant directement et indirectement la disposition de l'énergie solaire entre la surface et l'atmosphère de la planète, agissant ici et là, mais pas partout, vers le refroidissement de la surface par intensification de l'effet parasol.

La fumée noire, faite de particules de suie, constitue la plus visible de ces pollutions, décrite dès le début de l'ère industrielle mais présente en fait depuis que les hommes font du feu. En outre, les conditions de combustion imparfaite qui produisent ces particules visibles favorisent en même temps la production du monoxyde de carbone (CO), gaz toxique invisible. Pour les particuliers et les industriels, la fumée noire révèle du gaspillage, du carbone mal brûlé, et dans les pays avancés ce type de pollution est en voie de disparition. La visibilité de la fumée noire correspond à une absorption de lumière solaire, processus qui chauffe les particules de fumée et l'air environnant mais qui réduit l'énergie solaire

disponible plus bas. Toutefois, ces particules ne restent pas longtemps dans l'air, étant « lessivées » par les précipitations. De ce fait, leur rayon d'action reste limité : on les trouvera dans l'air sous le vent des points d'émission, feux de camp, feux de brousse ou de forêt, cheminées d'habitations ou d'usines. Ce rayon s'étend quand les particules arrivent dans des couches élevées de l'atmosphère à partir de hautes cheminées, encore plus à partir de la colonne d'air montant au-dessus de foyers très chauds. Les panaches de fumée des feux de forêt ou d'autres événements ponctuels, comme la mise à feu par l'Irak des puits de pétrole du Koweït en 1991, affectent des régions étendues pendant des périodes limitées. Cependant, dans la zone tropicale, où les incendies volontaires sont souvent employés comme outil (mal contrôlé) de transformation des forêts en pâturages ou en plantations, l'atmosphère est de plus en plus lourdement chargée d'aérosols carbonés. En 1998, des panaches de fumée ont pollué jusqu'à Singapour et Kuala Lumpur, à 1 000 km des feux de forêt en Indonésie. Les fumées noires apparaissent souvent dans les cieux des pays en développement rapide. Pour la première fois, la pollution industrielle massive affecte la zone tropicale, où le lessivage par les pluies se fait attendre pendant les mois de la saison sèche. Les aérosols et autres polluants s'accumulent dans l'atmosphère, formant le *nuage brun asiatique*, qui s'étale jusqu'au sud de l'océan Indien.

7. Le dioxyde de soufre (SO₂) et autres polluants gazeux. La combustion de carburants fossiles conduit inévitablement à l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère, partout autour du globe, mais ces émissions n'agressent pas les sens. En revanche, d'autres émanations ont depuis longtemps été perçues comme pollutions. Le charbon et le pétrole contiennent

souvent des impuretés de soufre, devenant du SO_2 lors de la combustion. Si aucun effort n'est fait pour les « lessiver » avant la sortie de la cheminée, ces émanations empestent le voisinage ; ont-elles des effets plus étendus ? Dans l'atmosphère, le SO_2 se transforme en particules acides, notamment en gouttelettes d'acide sulfurique, particules rapidement lessivées par les précipitations. Il en résulte que les différentes formes de soufre ne restent que quelques jours dans la troposphère. La distribution des aérosols de sulfates reflète, d'une part, la distribution des sources d'émission de gaz précurseurs (SO_2 lié à la combustion ainsi qu'à l'activité volcanique, diméthylsulfure, ou DMS, d'origine biologique marine), d'autre part, la circulation atmosphérique et les processus de précipitation. En revanche, les particules qui se forment dans la stratosphère après des éruptions volcaniques peuvent y rester des mois ou des années, suffisamment longtemps pour être dispersées loin de la zone de l'éruption. Ces particules renforcent l'effet parasol, réduisant le flux de rayonnement solaire disponible pour chauffer les basses couches de l'atmosphère et la surface de la Terre, agissant donc dans le sens d'un refroidissement global.

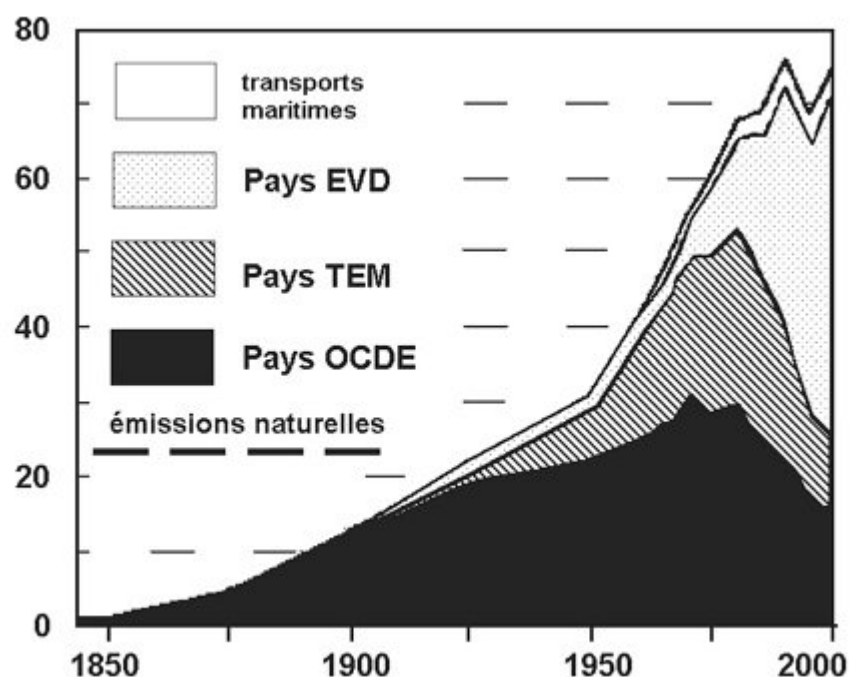


Fig. 3. – Émissions anthropiques de SO₂, en millions de tonnes de soufre par an (d'après Grübler, 2002). À noter que les émissions *naturelles* fluctuent énormément avec l'activité volcanique¹.

Les aérosols soufrés anthropiques, lessivés par les précipitations, peuvent-ils avoir des effets à grande échelle ? Vers les années 1960, les Scandinaves ont constaté l'augmentation de l'acidité de leurs lacs par des précipitations acides dues aux émissions croissantes de SO₂ en Grande-Bretagne et en Europe centrale. Cette pollution transfrontalière témoigne du transport atmosphérique des particules sur un millier de kilomètres et plus. Elles affectent donc la disponibilité du rayonnement solaire sur ces domaines étendus. Les émissions anthropiques de SO₂ ont été littéralement décuplées entre 1890 et 1990 (fig. 3), multipliant la charge d'aérosols de sulfates dans la troposphère par 10 ou 20 au-dessus de nombreuses régions : le quart nord-est des États-Unis,

toute l'Europe centrale et orientale jusqu'à l'Oural, et le nord-est de l'Asie. Depuis les années 1980, s'efforçant de rendre l'air propre, on a réduit notablement les émissions de SO_2 en Europe occidentale et en Amérique du Nord, comme dans d'autres pays de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique). On constate une diminution de l'acidité des lacs et des cours d'eau douce. Dans les pays de l'ancien bloc soviétique, « en transition vers l'économie de marché » (TEM), en Europe de l'Est et dans l'ancienne URSS, l'effondrement économique des années 1990 et la punition par le marché de la gabegie de l'énergie qui y régnait ont entraîné de même une forte réduction des émissions de SO_2 . Cependant, dans certains des pays en voie de développement (EVD), à croissance économique rapide, le lessivage du SO_2 à la cheminée n'est pas encore entré dans les mœurs. La quantité d'aérosols anthropiques croît sous le vent de ces nouveaux centres industriels de l'est et du sud de l'Asie. La croissance des émissions mondiales de SO_2 a ralenti en 2006 mais, s'il y a eu diminution des émissions de la Chine, celles de l'Inde continuent de croître².

Les émissions de SO_2 ont des effets directs et indirects sur le bilan radiatif de la Terre et, de là, sur le climat. Sur certaines régions, renforçant l'effet parasol, elles contrecarrent l'intensification de l'effet de serre. D'autres émissions, les oxydes d'azote (NO et NO_2) formés en petite quantité à partir de l'azote (N_2) de l'air « pur » selon les conditions de combustion, les composés organiques volatils, et d'autres gaz, peuvent avoir, en plus de différents effets sur la santé des êtres vivants, des effets indirects sur le bilan radiatif, puisqu'ils participent à des réactions chimiques affectant l'ozone.

II. – Entre le passé et l'avenir

1. **Les alternances du Pléistocène et l'Holocène.** – La transformation anthropique de l'atmosphère constitue un fait nouveau dans l'histoire planétaire, mais il ne faut pas croire pour autant à la constance de la composition atmosphérique au cours des âges. La géologie nous apprend que jusqu'à une époque relativement récente, il y a quelques centaines de millions d'années, l'oxygène (O_2) était fort rare dans l'atmosphère, et qu'au contraire le CO_2 était bien plus abondant, avec des concentrations dépassant 1 000 ppm (contre 405 ppm en 2018). L'atmosphère a évolué, tout comme le Soleil, la Terre et la Vie. Pour comprendre les climats du Crétacé (il y a plus de 65 millions d'années), il faut donc tenir compte de cette évolution, tout comme il faut tenir compte des différences de distribution entre terres et mers. Cependant, même en limitant notre regard au passé récent, au *Pléistocène*, deux millions d'années pendant lesquelles les continents n'ont guère bougé, nous découvrons les grandes alternances entre périodes glaciaires et interglaciaires. Les climats passés sont enregistrés dans les rapports isotopiques d'hydrogène et d'oxygène dans la glace accumulée au cours des millénaires, ou dans ceux de carbone et d'oxygène dans les carbonates (des squelettes de micro-organismes) des sédiments marins. De manière générale, la température moyenne ainsi déterminée suit une courbe descendante pendant environ 100 000 ans ([fig. 4](#)), cette courbe n'étant pas lisse mais plutôt en dents de scie, avec des périodicités de 21 000 et 40 000 ans. Le volume de glace sur les continents augmente au cours des périodes les plus froides, ces variations concordant avec celles déduites des marques laissées sur les terres par ces avancées de glace. Au cours de la descente vers le paroxysme glaciaire, l'accumulation de neige

devenant glace sur les continents près des pôles correspond à de l'eau retirée par évaporation aux océans, qui a fait baisser le niveau de la mer d'environ 130 m, variation qui paraît aussi dans les plages fossiles sous-marines près des côtes.

Le maximum glaciaire, le dernier ne remontant qu'à 18 000 ans avant le présent, se termine par une transition assez rapide, ne prenant que quelques millénaires, vers un climat « interglaciaire » comme celui qui règne depuis une dizaine de millénaires. En outre, et cela nous le savons grâce aux analyses minutieuses de la composition de bulles d'air piégées dans les glaces depuis des dizaines et des centaines de millénaires, la composition de l'air change de concert avec les variations du climat.

Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone et de méthane ont diminué lors des glaciations ([fig. 4](#)). Cependant, les concentrations maximales atteintes lors des périodes interglaciaires n'ont pas, avant 1800, dépassé 290 ppm pour le CO₂ et 750 ppb pour le méthane. La croissance de ces concentrations depuis le début de l'ère industrielle, fortement accélérée depuis 1950 ([fig. 2](#)), constitue un phénomène nouveau dans l'histoire de la planète. Les valeurs atteintes en 2017 (plus de 400 ppm pour le CO₂, 1 850 ppb pour le CH₄) dépassent nettement les niveaux maximaux depuis des millions d'années. Toutefois, on ne peut mesurer directement comment la vapeur d'eau (H₂O) atmosphérique a changé depuis des millénaires, car toute humidité dans les bulles d'air piégées devient rapidement de la glace.

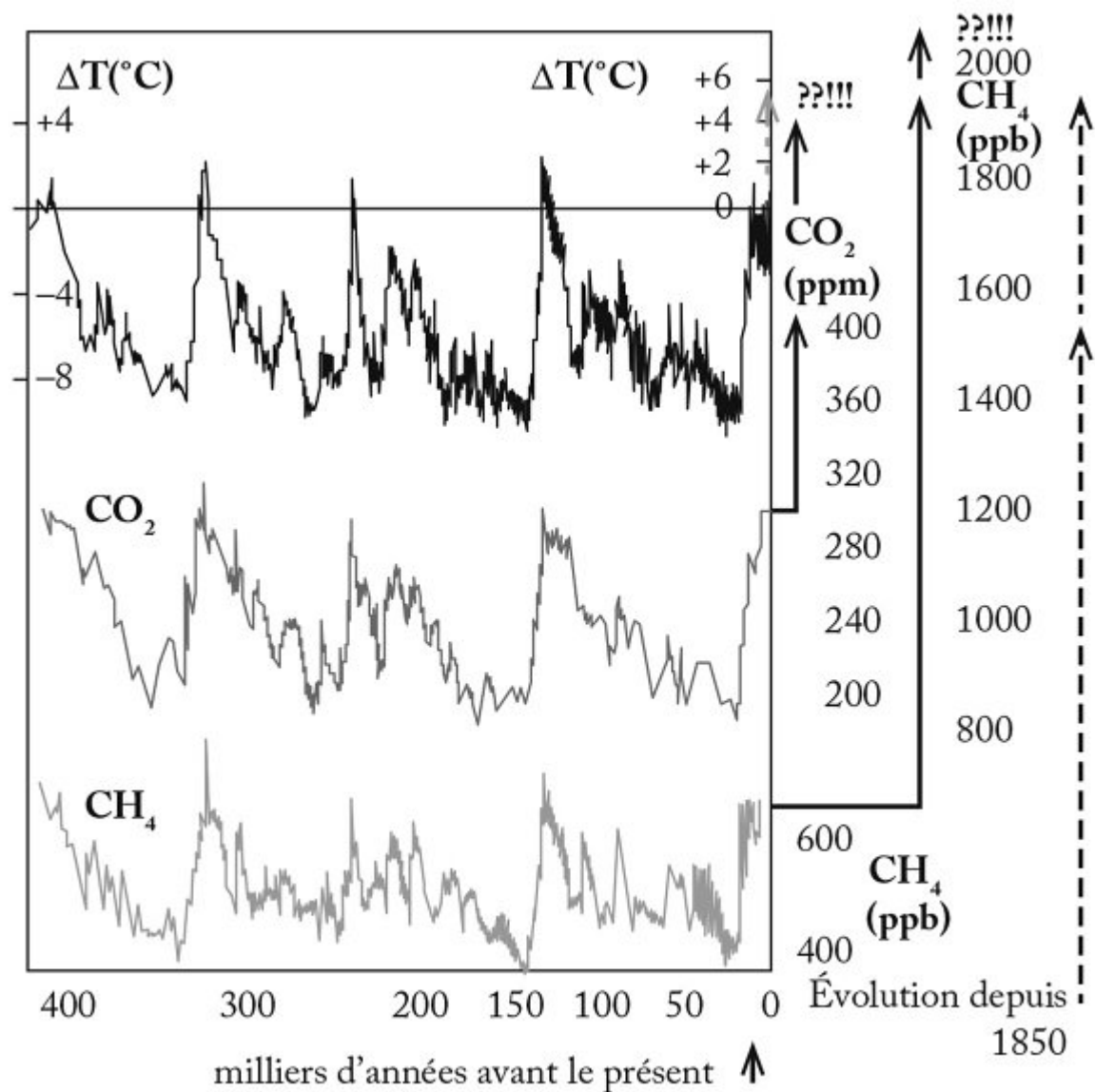


Fig. 4. – Quatre grands cycles climatiques enregistrés dans les glaces de Vostok (d'après J.-R. Petit *et alii*), 1999. Les flèches verticales à droite montrent les changements observés depuis 1900 et ceux attendus au ^{xxi}^e siècle (voir aussi la [fig. 2](#), pour l'évolution récente du CO₂ et celle du CH₄, et la [fig. 9](#), pour celle de la température).

En 1839, le géologue anglais Charles Lyell donna le nom d'*Holocène* (« entièrement nouvelle ») à la dernière période

interglaciaire, celle qui a vu l'invention de l'agriculture et la naissance des civilisations. Pourtant, du point de vue des climats et de la composition de l'atmosphère, rien ne distingue l'Holocène que connaissait Lyell des périodes interglaciaires précédentes (il y a 110 000 ans, 210 000 ans...). Maintenant, cela change, et très vite. La période *Holocène* devient en effet entièrement nouvelle du fait de l'action de l'Homme. Faut-il l'appeler l'*Anthropocène* ?

2. Les raisons du si rapide changement en cours

(A) *Le dioxyde de carbone*. – La quantité de CO_2 dans l'air dépend des échanges de ce gaz entre l'atmosphère et les océans, ainsi que d'éventuels apports (volcaniques) de l'intérieur de la Terre. Elle dépend aussi des échanges entre l'atmosphère et la biosphère liés à la photosynthèse, la respiration et l'oxydation. L'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique, d'un minimum proche de 180 ppm au dernier maximum glaciaire il y a 18 000 ans, à plus de 260 ppm au début de l'Holocène il y a 11 000 ans, ne doit certainement rien à l'activité humaine, bien que les hommes aient été présents. Elle est à la fois une *conséquence* du réchauffement à la fin de l'âge glaciaire et une *cause* de réchauffement supplémentaire, agissant en *boucle de rétroaction positive* de renforcement de l'effet de serre. Il en est de même pour le méthane, dont la concentration passe de 300 à 700 ppb entre le dernier maximum glaciaire et le début de l'Holocène. Depuis 8 000 ans, le climat et la composition de l'atmosphère sont restés *relativement* constants jusqu'au xix^{e} siècle. Il est vrai que la concentration du CH_4 est descendue à 500 ppb il y a 5 000 ans, et que celle du CO_2 , qui était à 260 ppm il y a 8 000 ans, n'a atteint 280 ppm qu'il y a 2 000 ans. Ces changements reflètent l'évolution de la biosphère qui

a mis quelques millénaires pour profiter pleinement du réchauffement et du recul des glaces. Certains chercheurs estiment y déceler aussi quelques effets des débuts de l'agriculture.

Depuis deux siècles et demi, tout change, de plus en plus vite. À l'origine de ce changement rapide, *nouveau*, il y a l'Homme. Le développement de l'élevage et de l'agriculture, commencé il y a environ 10 000 ans, modifie le couvert végétal, augmentant souvent l'albédo (la réflectivité) de ces surfaces qui s'étendent avec la croissance de la population humaine, modifiant aussi le « budget carbone » des échanges entre l'atmosphère et les terres. Accélérant ce changement, un nouveau processus modifie directement la composition de l'air. En effet, la Révolution industrielle démarre en Grande-Bretagne, avec le charbon comme source d'énergie fondamentale. Cette combustion de carburants fossiles engendre un nouveau flux de plus en plus grand de CO₂ vers l'atmosphère. À la fin du XIX^e siècle, alors que l'atmosphère contient environ 2 350 milliards de tonnes de CO₂ (640 milliards de tonnes de carbone), la combustion (surtout du charbon) transforme en CO₂ quelque 500 millions de tonnes de carbone fossile *par an*. À la fin du XX^e siècle, la combustion (brûlant maintenant du pétrole et du gaz naturel en plus du charbon) en transforme quinze fois plus. Les émissions croissantes de CO₂ vers l'atmosphère créent une situation de déséquilibre prononcé du budget carbone, augmentant les flux de CO₂ vers l'océan et vers la partie de la biosphère qui peut tirer profit de cette surabondance de matière première de la photosynthèse. Cependant, ces flux augmentés vers ce que l'on appelle les « puits de carbone » ne compensent qu'en partie la nouvelle source qu'est la combustion de carburants fossiles, sans pouvoir l'équilibrer. Sur les 1 300 milliards de tonnes de CO₂ émis vers l'atmosphère par les activités humaines depuis 1900, surtout par la combustion de

carburants fossiles, environ la moitié s'y est accumulée, le reste étant absorbé en partie dans l'océan, en partie dans la biosphère.

Les spécialistes sont loin d'avoir déterminé la part des différents mécanismes en jeu : dissolution dans les couches océaniques superficielles, passage par des phytoplanctons et zooplanctons vers les fonds océaniques, fertilisation de la biomasse continentale en zone tempérée, passage des continents vers les océans *via* l'érosion et le transport fluvial. L'importance respective des forêts de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie en tant que puits de carbone reste un sujet de controverses scientifiques aussi bien que diplomatiques. La zone tropicale agit aujourd'hui comme *source* de CO₂ à la fois parce que l'on brûle la majeure partie de la matière végétale coupée lors du défrichement et parce que la dénudation des sols intensifie l'oxydation de la matière organique. Le défrichement en Amérique du Nord au XIX^e siècle, et plus encore, la déforestation en zone tropicale au XX^e siècle ont sans doute contribué à la montée du CO₂ avant 1970. Néanmoins, depuis 1950, la combustion de carburants fossiles domine de loin. La diminution du rapport isotopique (¹⁴C/¹²C) trahit l'apport croissant à l'atmosphère de CO₂ produit à partir de carbone fossile, ne contenant pas l'isotope radioactif carbone-14 (demi-vie 5 700 ans) produit dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques.

(B) *Le méthane*. – L'augmentation spectaculaire du méthane (CH₄) atmosphérique depuis 1850 dépend de plusieurs facteurs. Une partie résulte de l'exploitation de carburants fossiles, avec augmentation du flux d'évasion du grisou des gisements de charbon, et des fuites de gaz naturel (du CH₄ aussi) dans beaucoup de champs de pétrole. Si le gaz naturel est de plus en plus souvent capté pour être exploité et donc pour être utilement brûlé et

transformé en CO_2 , on le laisse encore trop fréquemment brûler inutilement dans les torchères, voire s'échapper tel quel dans l'atmosphère, à la sortie des puits ou par fuites de gazoducs mal entretenus. Cependant, la plus grande partie du méthane récemment ajouté à l'atmosphère provient de mécanismes biologiques favorisés par la croissance de la population humaine et l'extension concomitante de l'agriculture et de l'élevage. Certaines bactéries qui vivent dans des milieux sans oxygène produisent du méthane – d'où le gaz des marécages et les feux follets. Or, dans une partie importante du monde, le riz constitue l'aliment de base de la population, et les surfaces consacrées à sa culture augmentent. Dans beaucoup de cas, la culture se fait dans des paddy inondés où prolifèrent les bactéries méthanogènes. Aujourd'hui, les émissions dues à la riziculture avoisinent les cent millions de tonnes de CH_4 par an, plus que le double de ce qui est attribué à l'extraction du charbon, cinq fois plus que les pertes dans les champs de pétrole ou les fuites des gazoducs.

Les émissions de méthane par la riziculture ont plus que doublé depuis 1850 ; celles liées à l'élevage ont grandi encore plus, constituant depuis 1990 la source la plus importante. Accompagnant la croissance de la population humaine et de sa richesse, la population de bovins a augmenté dans des proportions spectaculaires. Or, des bactéries méthanogènes vivent aussi dans les estomacs des ruminants, et les rots des vaches contribuent sensiblement à l'augmentation du méthane dans l'atmosphère. Il s'agit d'ailleurs de l'atmosphère de toute la planète et pas seulement des régions d'élevage, car bien qu'il s'oxyde et se transforme donc en CO_2 , le CH_4 réside suffisamment longtemps dans l'atmosphère – environ cinq ans – pour être bien mélangé par la circulation atmosphérique. Ce gaz reste rare (moins de 2 ppm), mais sa

contribution à l'intensification de l'effet de serre n'est pas négligeable. Si la concentration du CH_4 semble se stabiliser vers l'an 2000, elle a recommencé à croître depuis (fig. 2). On peut soupçonner que la réduction des fuites des puits de pétrole et des gazoducs auparavant mal entretenus a réduit les pertes de CH_4 , mais comment évoluent les émissions liées à la riziculture et à l'élevage des ruminants pour des populations humaines croissantes ?

(C) *Les autres gaz.* – Parmi les autres GES qui augmentent de façon significative, il faut compter le protoxyde d'azote (N_2O), lié à la perturbation massive du cycle de l'azote par l'emploi d'engrais industriels. De plus, il y a les chlorofluorocarbures ou CFC, extrêmement utiles pour de nombreuses applications (notamment en réfrigération) à cause de leur inertie chimique. Cette inertie fait que ces molécules perdurent et s'accumulent dans l'atmosphère, ne pouvant être détruites que dans la stratosphère où elles participent à des réactions de destruction catalytique d'ozone. Ces molécules restent extrêmement rares, avec en 2016 des concentrations de 0,516 ppb pour le CFC-12, 0,232 ppb pour le CFC-11. Avec l'arrêt de leur fabrication en application du Protocole de Montréal, signé le 16 septembre 1987, leurs concentrations n'augmenteront plus ; et, pour certains, elles commencent à décroître. Leur disparition totale prendra cependant quelques décennies. Entre-temps, malgré leur extrême rareté, ils contribuent au renforcement de l'effet de serre comme à la destruction d'ozone stratosphérique. De manière générale, le renforcement de l'effet de serre, qui intensifie la perte d'énergie radiative des hautes couches atmosphériques vers l'espace en même temps qu'il augmente le rayonnement infrarouge de l'atmosphère vers le bas, *refroidit* la basse stratosphère. Ce

refroidissement favorise d'ailleurs la formation des nuages stratosphériques polaires et risque de ce fait de faire perdurer l'appauvrissement de la couche d'ozone malgré la disparition progressive des CFC.

Les aérosols aussi ont beaucoup varié au cours du passé. Les arrivées d'aérosols ont diminué d'un facteur 100 depuis 18 000 ans, à la fois parce que le climat du dernier maximum glaciaire était plus sec qu'au présent, avec des déserts plus étendus, et parce que la circulation atmosphérique plus vigoureuse pouvait transporter plus efficacement les poussières vers l'Antarctique. Quant aux aérosols de sulfates, on trouve dans les carottes de glace du Groenland des pics d'acidité liés aux grandes éruptions volcaniques, comme celles de Tambora en 1815 et de Krakatoa en 1883. Ces retombées restent cependant transitoires. D'autres analyses révèlent le détail des changements des derniers millénaires et siècles. Du fait du très court temps de résidence atmosphérique des particules, une décision d'arrêter tel type de pollution (par exemple, le plomb dans l'essence) se fait sentir presque immédiatement. La charge d'aérosols augmente quand les taux d'émission ou de formation augmentent, mais les aérosols ne s'accumulent pas dans l'atmosphère, contrairement à ce qui se passe pour le CO₂ ou les CFC.

Les taux de déposition d'aérosols sulfatés, très réduits il y a trois siècles par rapport au dernier maximum glaciaire, ont augmenté avec l'industrialisation et la combustion de charbon et de pétrole contenant du soufre. Dans l'hémisphère Nord, les émissions anthropiques de soufre (essentiellement sous forme de SO₂) ont été multipliées par six entre 1860 et 1900, dépassant alors les flux naturels (océans, volcans, sols et plantes) ; une autre multiplication par six depuis 1900 amène la production à plus de 73 millions de

tonnes de soufre en l'an 2000. Les émissions de SO₂ par le trafic maritime dépassent les sources naturelles sur tout l'Atlantique Nord. Au xx^e siècle, cette croissance spectaculaire a certainement conduit à une augmentation de la quantité d'aérosols sulfatés et à un renforcement régionalement différencié de l'effet parasol.

Toutefois, les émissions européennes et nord-américaines *diminuent* depuis les années 1960. Des carburants (pétrole et surtout gaz naturel) contenant moins de soufre ont en partie remplacé le charbon à partir de 1950, et depuis 1980, d'importants efforts ont été faits pour lessiver les émissions en piégeant le SO₂ avant sa sortie de la cheminée. De plus, l'effondrement économique du bloc soviétique a fortement réduit les émissions du SO₂ (comme d'ailleurs du CO₂) en Europe de l'Est. En revanche, les émissions de l'Asie ont plus que doublé depuis 1970. Résultat : augmentation très nette de la pollution de sulfates en Asie, mais diminution en Europe et en Amérique du Nord. En France, les émissions de SO₂ sont passées de 1 904 à 3 319 kilotonnes par an (kt/a) entre 1960 et 1975, tombant à 688 kt/a en 2000. L'évolution allemande a été encore plus spectaculaire, de 7 607 kt/a en 1985 (RFA + RDA) à 2 099 kt/a en 1995 après la réunification, à 744 en 2000, avec l'objectif de 518 en 2010. L'air est devenu tout de suite plus propre pour ce qui concerne le SO₂ et les aérosols ; quant au retour des lacs et cours d'eau douce à des conditions moins acides, il prendra plus longtemps, mais il est bien engagé.

3. Les scénarios d'émissions. – Que se passera-t-il d'ici 2100 ? Si l'on laisse de côté les effets sporadiques d'éruptions volcaniques imprévisibles, la charge d'aérosols et sa répartition géographique réagiront très rapidement à toute évolution de la carte d'émissions. Si on met en place partout dans le monde des

systèmes de lessivage du SO_2 réduisant les émissions de 80 %, la quantité d'aérosols anthropiques de sulfates pourrait diminuer de 50 %. Pour la teneur atmosphérique en GES, surtout pour le CO_2 et les CFC, l'atmosphère réagira bien moins rapidement, car le temps de résidence atmosphérique de ces gaz se mesure en décennies et non en jours. Le plafonnement des émissions de CO_2 ne stabilisera pas la quantité de ce gaz dans l'atmosphère, et les niveaux qui pourront être atteints dépendront justement de l'évolution des sources – combustion de carburants fossiles, déforestation – comme de celle des puits – forêts essentiellement, à moins de trouver autre chose. L'avenir de ces sources (et des puits éventuels) dépendra du développement économique et de la croissance démographique, de la disponibilité (ou l'épuisement) de différents carburants, ainsi que de choix technologiques et en fin de compte politiques. Des chercheurs en sciences sociales s'efforcent d'établir des modèles de ces différents processus. Dans le cadre du GIEC, les experts ont préféré formuler un certain nombre de scénarios d'émissions de différents gaz. Dans certains scénarios, les émissions de CO_2 augmenteront encore d'un facteur dix au cours du xxi^{e} siècle, mais dans d'autres elles tombent à zéro ou deviennent légèrement négatives avec le développement de puits de carbone. La plupart des scénarios d'émissions se situent cependant entre une stabilisation – donc une poursuite de l'enrichissement de l'atmosphère – et un facteur cinq d'augmentation, c'est-à-dire une accélération de l'enrichissement. Pour le CH_4 , certains scénarios envisagent une réduction (de 30 %) des émissions, d'autres une augmentation pouvant aller jusqu'à un facteur trois. La plupart des scénarios – mais pas tous – prévoient une forte réduction des émissions de SO_2 en Europe et en Amérique du Nord avant 2050, mais une poursuite de leur croissance en Asie jusqu'en 2050. Les

émissions de la Chine, passées de 16 à 33 mégatonnes par an entre 1990 et 2006, descendront-elles à moins de 20 Mt/a ? Pour les émissions de l'Inde, montées à 10 Mt/a en 2013, les prévisions vont de 13 à 44 Mt/a en 2050. Selon le modèle retenu, le total mondial atteindra entre 60 et 110 Mt/a entre 2020 et 2050. Pratiquement tous les scénarios laissent prévoir que les émissions mondiales auront sensiblement diminué en 2100, peut-être à 20 Mt/a, soit le tiers du total enregistré pour 1990.

Une fois adopté un scénario d'émissions, le calcul de l'évolution de la composition atmosphérique fait intervenir les processus physicochimiques qui ont lieu dans l'atmosphère, notamment l'oxydation du méthane, la formation des aérosols à partir du SO_2 et leur lessivage par les précipitations. Il faut en outre tenir compte des échanges entre l'atmosphère et les océans, entre l'atmosphère et la biosphère. Les changements climatiques entraînés par les variations de la composition atmosphérique vont à leur tour influencer sur ces différents processus. Certains modèles laissent en particulier prévoir que les effets du réchauffement sur la santé de certaines forêts pourraient transformer celles-ci en *sources* de carbone pour l'atmosphère, alors qu'à présent elles jouent plutôt le rôle de *puits*.

CHAPITRE II

L'atmosphère contrôle le climat

I. – La transformation du flux radiatif solaire

1. **Les facteurs de contrôle du climat.** – Le Soleil fournit plus de 99,95 % du flux d'énergie qui maintient des températures « confortables » à la surface de la Terre. Sauf à une échelle très locale (dans les bouches des volcans et dans les sources hydrothermales des dorsales océaniques), le flux de chaleur venant de l'intérieur de la Terre – 0,1 watt par mètre carré en moyenne – reste globalement négligeable à côté des 240 watts par mètre carré de rayonnement solaire transformé en chaleur. Même si le Soleil reste constant – il l'a été à 0,1 % près depuis 1970, et probablement à 0,25 % près depuis 1600 – le climat peut varier, car l'atmosphère contrôle d'une part la fraction du rayonnement solaire effectivement transformé en chaleur, d'autre part l'évacuation de cette chaleur vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge thermique. L'altération de l'atmosphère par l'Homme explique une partie du réchauffement constaté depuis la fin du XIX^e siècle. La poursuite et la durabilité de cette altération entraîneront, par le renforcement croissant de l'effet de serre et le plafonnement sinon la diminution de

l'effet parasol, un réchauffement bien plus marqué d'ici la fin du xxi^{e} siècle. Le climat change. Avant d'étudier les détails de ce changement, examinons les facteurs de contrôle du climat, dans le cadre d'un modèle très simple du système climatique, une sorte de « boîte noire » où tout s'exprime en termes de valeurs moyennes sur la surface du globe et sur l'année ([fig. 5](#)).

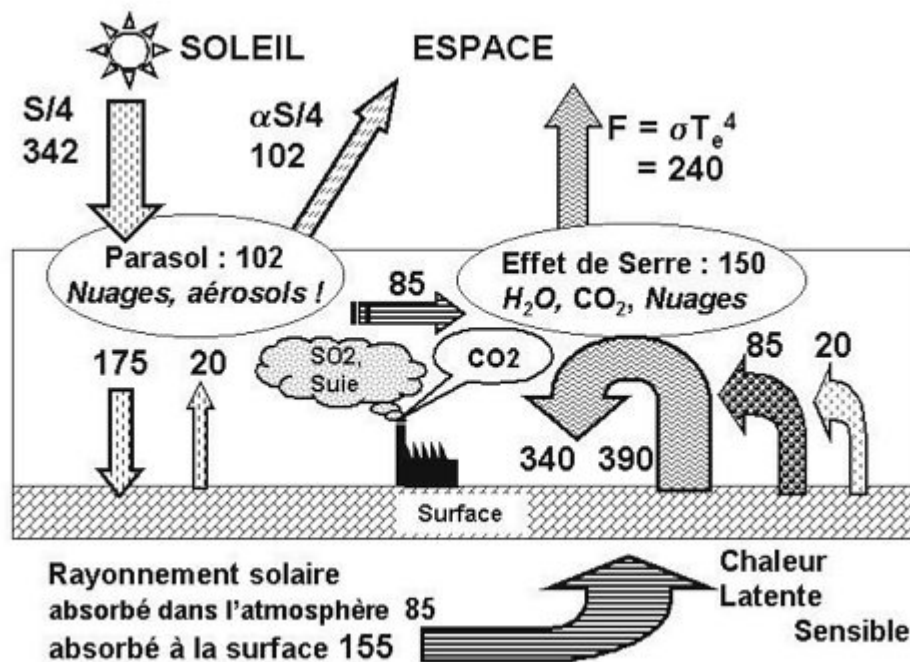


Fig. 5. – Transformation de l'énergie solaire : termes du bilan énergétique planétaire (flux en Wm^{-2}) et points sensibles aux perturbations anthropiques. En fonction de leur température et de leur opacité infrarouge, les couches atmosphériques absorbent et réémettent du rayonnement infrarouge, donnant un flux infrarouge descendant vers la surface de l'ordre de $340 Wm^{-2}$, alors que le flux émis vers le haut par la surface (à une température de $+ 15\text{ }^{\circ}C$) vaut $390 Wm^{-2}$. La surface ne perd donc que $50 Wm^{-2}$ sous forme de rayonnement infrarouge. Or, l'absorption d'énergie solaire apporte $155 Wm^{-2}$ à la surface. Le bilan s'équilibre par les pertes de chaleur liées à la convection turbulente et à l'évaporation (dont l'évapotranspiration par la végétation), ces flux de chaleur sensible et de chaleur latente contribuant à réchauffer l'atmosphère.

(A) *La constante solaire S.* – Ce modèle comporte un facteur de contrôle véritablement externe au système – la « constante solaire » S ($= 1\,368$ watts par mètre carré), le flux du rayonnement solaire à la distance moyenne Soleil-Terre. En fait, le flux moyen qui éclaire la

planète (au « sommet de l'atmosphère ») vaut $S/4$, le facteur quatre venant du rapport entre la surface $4\pi R^2$ du globe (R étant le rayon de la Terre presque sphérique), et sa section πR^2 pour l'interception du rayonnement solaire. Il fait toujours nuit sur une moitié de la Terre, et sur la moitié éclairée, le Soleil se trouve au zénith en un seul point à chaque instant, quelque part entre zénith et horizon partout ailleurs.

(B) *L'albédo α* . – Le système climatique renvoie vers l'espace une fraction du flux solaire, l'albédo α ($= 0,30$).

Le rayonnement ainsi réfléchi ou diffusé vers le haut ne peut jouer aucun rôle dans le réchauffement de la surface et de l'atmosphère. Cette réflexion et diffusion dépendant surtout des nuages et de l'air, quoique aussi des surfaces plus ou moins claires, je propose de l'appeler *l'effet parasol*. Le flux de rayonnement solaire absorbé, converti en chaleur dans le système, vaut donc $(S/4)(1 - \alpha)$. Finalement, le système climatique doit évacuer vers l'espace ce flux énergétique qui arrive en permanence. Il peut le faire uniquement par un flux F de rayonnement infrarouge thermique vers l'espace. Pour un système en équilibre, sans stockage de chaleur, celui-ci doit exactement compenser le flux solaire converti en chaleur. Si l'on suppose que la planète rayonne vers l'espace comme un « corps noir » ou radiateur parfait, on peut relier ce flux de rayonnement infrarouge à une température *effective* T_e selon la formule : $F = \sigma T_e^4$, où σ ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) est la constante de Stefan-Boltzmann.

(C) *L'effet de serre*. – Compte tenu de l'opacité partielle de l'atmosphère, la température effective ne correspond pas à une moyenne de la température à la surface, mais à une sorte de moyenne pondérée, en fonction de la longueur d'onde, des

températures des couches atmosphériques d'où le rayonnement infrarouge s'évade effectivement vers l'espace. Pour développer la discussion en termes du climat à la surface de la Terre, il faut introduire deux paramètres : 1/ la température moyenne à la surface du globe T_s , paramètre de l'état climatique global ; et, 2/ un paramètre – « l'effet de serre normalisé » g – qui relie à cette température T_s le flux infrarouge F vers l'espace : $F = \sigma T_e^4 = (1 - g) \sigma T_s^4$. Pour un astre sans atmosphère, $g = 0$. La condition d'équilibre climatique correspond à un bilan radiatif (rayonnement net R_N) nul, et s'écrit :

$$R_N = 0 = (S/4) (1 - \alpha) - (1 - g) \sigma T_s^4 \quad (1)$$

Les facteurs de contrôle S , α et g déterminent la valeur du paramètre d'état climatique T_s . Dans cette schématisation à l'extrême du bilan radiatif planétaire, la nature de ces moyennes comporte beaucoup de flou ; la moyenne des températures à la surface (ou plutôt la moyenne de T_s^4) ne correspond pas exactement à la moyenne des flux de rayonnement infrarouge thermique émis par les surfaces vers le haut, pour chacune desquelles il faudrait faire intervenir les valeurs spécifiques d'un paramètre d'émissivité. De même, l'albédo α et le facteur g , l'effet de serre normalisé, paramètres globaux dans l'équation (1), varient énormément sur la planète en fonction des conditions atmosphériques, notamment la couverture nuageuse, l'humidité et la variation verticale de la température.

Le tableau suivant donne les valeurs des différents paramètres globaux du climat pour les planètes Terre, Mars et Vénus, ainsi que pour la Lune, S étant inversement proportionnel au carré de la distance du Soleil. L'excentricité de l'orbite de Mars entraîne de fortes variations du flux solaire incident et donc de T_e , qui ne paraissent pas dans le tableau. Les températures sont en Kelvin,

soit °C + 273. Ainsi la température effective de la Terre est – 18 °C, mais la température moyenne à sa surface vaut + 15 °C.

Climats planétaires (paramètres calculés d'après NASA NSSDC, 2003)

Planète	S (Wm ⁻²)	α	F (Wm ⁻²)	T _e (K)	T _s (K)	g
Terre	1 368	0,30	240	255	288	0,39
Lune	1 368	0,11	304	271	271	0
Mars	592	0,25	111	210	217	0,12
Vénus	2 639	0,75	165	232	750	0,99

2. La nature physique des facteurs de contrôle

(A) *La constante solaire S* (1 368 Wm⁻²). – Elle mesure le rayonnement électromagnétique solaire qui baigne la planète Terre, spécifiquement le flux à la distance moyenne Soleil-Terre, intégré sur toutes les longueurs d'ondes. Ce rayonnement est composé surtout de lumière visible (longueurs d'onde λ : 0,4 – 0,7 μm) et de rayonnement infrarouge proche (0,7 – 4,5 μm). Le rayonnement ultraviolet ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$) joue un rôle central dans la physique de la moyenne et haute atmosphère, où il est presque entièrement absorbé, notamment par l'ozone de la stratosphère aux longueurs d'onde de 0,24 à 0,3 μm . De toute façon, comparé aux flux du visible et du proche infrarouge, les flux d'énergie (Wm⁻²) véhiculés dans l'ultraviolet comme dans l'infrarouge moyen ($\lambda > 4,5 \mu\text{m}$) sont très faibles.

(B) *L'albédo α* . – Il dépend fortement de la couverture nuageuse, comme on le voit facilement sur une image satellitaire en lumière visible. Le flux moyen de rayonnement solaire réfléchi par la planète vers l'espace ($\alpha S/4$) vaut 102 Wm^{-2} , dont la moitié vient de la diffusion par les collections de gouttelettes d'eau liquide et de cristaux de glace que sont les nuages. Si les nuages fins ont un albédo faible, des nuages très épais peuvent renvoyer vers l'espace jusqu'à 85 % du rayonnement incident. L'albédo d'un nuage individuel dépend, bien sûr, de ses propriétés physiques (nombre et taille des gouttes, épaisseur de la couche). Les contributions des différents nuages à l'albédo planétaire doivent être pondérées par le flux de rayonnement solaire incident qui dépend de la latitude, de la date et de l'heure. Aux moyennes et hautes latitudes, les nuages d'hiver contribuent peu à l'effet parasol global, car il y a peu de soleil ; et, dans la mesure où les nuages bas (surtout au-dessus de l'océan) tendent à se dissiper au cours de la matinée, leur influence sera diminuée. Les nuages contribuent à la moitié de l'effet parasol alors qu'ils ne contiennent qu'une fraction infime – bien moins de 0,1 % – de la masse de l'atmosphère. L'air en revanche, constitué à 98 % de molécules diatomiques d'azote (N_2) et d'oxygène (O_2), fournit une contribution constante mais bien plus faible, quelques watts par mètre carré, que l'on appelle la diffusion Rayleigh, d'après le grand physicien britannique. Cette diffusion, plus forte pour les courtes longueurs d'onde, donne le ciel bleu. Soustrayant ce bleu du faisceau de lumière solaire blanche (mélange de toutes les couleurs), la diffusion Rayleigh ne laisse qu'une couleur rouge au Soleil quand il est vu à travers une forte épaisseur d'atmosphère, près de l'horizon.

La diffusion du rayonnement solaire par ciel clair dépend principalement des molécules de l'air pur, mais l'atmosphère contient

aussi en suspension des particules solides et liquides – les *aérosols* – en nombre et en taille variables. Certains sont d'origine naturelle – poussières désertiques emportées par le vent, cristaux de sel des embruns, aérosols formés à partir du SO_2 volcanique ou du DMS (diméthylsulfure) émis par les algues, aérosols organiques (terpènes et autres) émis par différentes plantes. Mais d'autres aérosols résultent d'activités humaines – notamment les suies lorsque l'on brûle mal, et les aérosols de sulfates formés à partir du SO_2 quand on brûle des carburants contenant du soufre. Certains aérosols renforcent la diffusion de lumière solaire vers l'espace, augmentant l'albédo planétaire. D'autres particules – les suies notamment – absorbent autant qu'elles diffusent la lumière ; elles n'augmentent pas l'albédo planétaire, mais elles transforment une partie du flux solaire en chaleur dans les couches où elles se trouvent, diminuant le flux disponible pour chauffer la surface plus bas. Pour évaluer les contributions des différents types d'aérosols naturels et anthropiques à l'albédo planétaire et à l'effet parasol, il faut prendre en compte à la fois leurs caractéristiques physiques et leur localisation géographique. Ainsi, les aérosols peuvent assez fortement modifier l'albédo lorsqu'ils se trouvent au-dessus des océans, mais peu au-dessus des déserts ou des champs de neige. En plus des contributions atmosphériques à l'albédo planétaire, il faut considérer celles des différentes surfaces terrestres. Leur capacité de réflexion va de quelques pour-cent pour la surface de la mer et la forêt tropicale, à des valeurs plus fortes pour les terres cultivées, dépassant 50 % pour certains déserts, et jusqu'à 80 % pour les surfaces de neige et de glace. La plupart de ces contributions varient avec les saisons, comme la nature de la couverture végétale ou l'extension de la glace de mer et de la neige. Toutes peuvent varier à plus long terme.

(C) *L'effet de serre.* – L'analogie imparfaite avec une serre vient de ce que l'atmosphère laisse pénétrer jusqu'à la surface environ la moitié du rayonnement solaire incident, alors que très peu du rayonnement infrarouge thermique émis depuis la surface peut s'évader directement vers l'espace. L'analogie est imparfaite : dans une serre, la limitation des pertes de chaleur vient autant du blocage de la convection que de l'opacité infrarouge des vitres. Quoi qu'il en soit, la surface du globe et les couches basses de l'atmosphère se réchauffent suffisamment pour que le rayonnement infrarouge s'évadant vers l'espace équilibre les 240 Wm^{-2} de rayonnement solaire converti en chaleur au sein du système ; cela donne la température moyenne de surface T_s nettement supérieure à $T_e = 255 \text{ K}$. Les mouvements atmosphériques ainsi que les changements d'état de l'eau jouent cependant un rôle essentiel dans la détermination des températures dans l'atmosphère et à la surface, rôle qui n'apparaît pas dans le modèle, trop schématique, car le seul paramètre g est censé y expliquer la différence entre T_s et T_e .

L'opacité infrarouge de l'atmosphère dépend surtout de la présence dans l'air de gaz constitués de molécules polyatomiques, en premier lieu la vapeur d'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2), à un moindre degré l'ozone (O_3). Les gaz constituant 99 % de l'atmosphère, à savoir les molécules diatomiques d'azote (N_2) et d'oxygène (O_2), et les atomes d'argon (Ar), n'interagissent pratiquement pas avec le rayonnement infrarouge du fait de la trop grande simplicité de leur structure. En revanche, les molécules de trois atomes ou plus ont de nombreux modes de vibration et de rotation et, aux longueurs d'onde du rayonnement infrarouge émis par la surface et l'atmosphère, absorbent efficacement. De l'espace, on voit la signature spectrale ([fig. 6](#)) des gaz à effet de serre,

notamment les bandes d'absorption de la vapeur d'eau et du CO₂. Ces bandes apparaissent en *émission* dans un spectre obtenu au sol du rayonnement atmosphérique vers le bas.

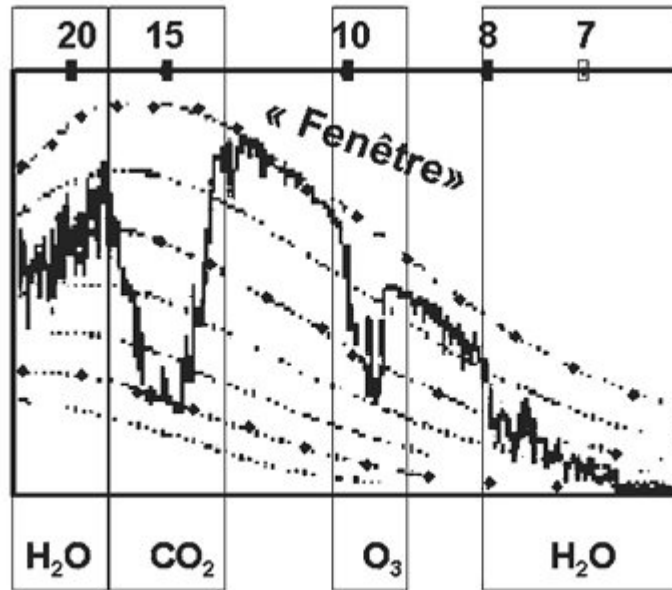


Fig. 6. – Spectre infrarouge de la Terre (Sahara, midi, ciel clair ; l'échelle du haut donne la longueur d'onde en micromètres). Les courbes en tirets correspondent au rayonnement de corps noir pour différentes températures.

Cependant, en plus des *gaz*, les *nuages* contribuent à l'effet de serre : pour la plupart opaques au rayonnement infrarouge, ils absorbent le rayonnement montant des couches plus basses, le réémettant selon leurs propres températures. Le rayonnement infrarouge d'un nuage vers l'espace dépend de la température de son sommet, faible pour les sommets élevés, même au-dessus de surfaces chaudes. Les nuages épais et hauts, en particulier ceux des tropiques, contribuent donc fortement à l'effet de serre planétaire. L'effet de serre global $g\sigma T_s^4$ égale 154 Wm^{-2} ; la vapeur

d'eau contribue pour environ 90 Wm^{-2} à ce total, le CO_2 pour environ 32 Wm^{-2} , et les nuages à hauteur de 30 Wm^{-2} , le reste étant dû à l'ozone et à divers constituants mineurs (CH_4 , N_2O ...). Sur la planète Vénus, le très fort effet de serre vient de son atmosphère, cent fois plus massive que celle de la Terre et composée essentiellement de CO_2 . Sur Mars, le CO_2 constitue également plus de 90 % de l'atmosphère, mais celle-ci est extrêmement ténue, d'où un effet de serre très faible.

II. – Le forçage du changement

1. **Définition des forçages.** – Les physiciens emploient souvent la notion de *forçage* dans le sens d'une perturbation par rapport à une situation d'équilibre. Pour le modèle schématique du système (équation 1), le forçage vient des perturbations d'un, deux ou trois des facteurs de contrôle S , α et g . Le système s'écarte de l'équilibre tant que son état, représenté par la température T_s , ne change pas. Pour des petites perturbations ΔS , $\Delta\alpha$ et Δg par rapport à un état d'équilibre correspondant à $S = S_0$, $\alpha = \alpha_0$ et $g = g_0$, avec $T_s = T_0$, la somme X des forçages donne un bilan radiatif $R_N \neq 0$:

$$R_N = X = (S/4) (1 - \alpha) - (1 - g) \sigma T_0^4$$

$$R_N = (1 - \alpha_0) \Delta S/4 - (S_0/4) \Delta\alpha + \sigma T_0^4 \Delta g \neq 0 \quad (2)$$

Quel réchauffement (refroidissement) ΔT faut-il pour rétablir l'équilibre, c'est-à-dire ramener R_N à zéro ? Si l'on ne tient compte que de l'augmentation du rayonnement thermique σT^4 avec une augmentation de T , on calcule une sensibilité climatique *faible* : pour un forçage X de 1 Wm^{-2} , un réchauffement ΔT de seulement 0,18 K suffirait pour ramener le système climatique à l'équilibre avec un

bilan radiatif $R_N = 0$. L'existence, en plus de cette réaction radiative, de *rétroactions* opérant sur α et g , complique singulièrement la réponse à cette question.

2. Les forçages naturels. – Selon les mesures obtenues à partir de satellites artificiels depuis les années 1970, la « constante solaire » S n'a varié qu'entre 1 365 et 1 368 watts par mètre carré, soit $\pm 0,1 \%$. Les premières mesures ont été faites par le physicien français Pouillet en 1837 ; l'observation systématique a commencé en 1902 avec les stations de montagne établies par Charles Abbot en Amérique. Cependant, même en altitude, une partie de l'ultraviolet est absorbée par l'atmosphère, et les variations détectées peuvent résulter autant de paramètres atmosphériques que de paramètres intrinsèquement solaires. Nul doute que toute variation significative du Soleil doit influencer sur le climat, et que l'on ne peut exclure des variations (de l'ordre de $0,25 \%$?) avant 1970. Quelques spécialistes de physique solaire ont cherché à estimer les variations des derniers siècles à partir du nombre de taches solaires (observées depuis Galilée) ou d'autres indices de l'activité magnétique du Soleil. Toutefois, il n'existe pas de base physique rigoureuse pour de telles estimations.

Les éruptions volcaniques injectent parfois de grandes quantités de SO_2 dans la stratosphère, ce gaz formant ensuite des aérosols de sulfates qui résident plusieurs mois, voire quelques années, dans ces couches stables, sans lessivage par les précipitations. Ces voiles d'aérosols augmentent l'albédo planétaire, produisant un forçage négatif $-(S/4) \Delta\alpha$, qui diminue l'énergie entrant dans le système. Dans le cas des éruptions très récentes, les satellites fournissent des mesures de ce forçage. Après l'éruption du mont Pinatubo aux Philippines en juin 1991, le forçage atteint $-2,7 \text{ Wm}^{-2}$

² en septembre (-10 Wm^{-2} dans la bande équatoriale), avant de disparaître progressivement au cours des mois qui ont suivi. Si une éruption volcanique devait augmenter de manière importante la quantité de CO_2 dans l'atmosphère, cela augmenterait l'effet de serre, mais rien n'indique qu'une éruption des derniers millénaires ait émis suffisamment de CO_2 pour avoir un tel effet planétaire. Si, en revanche, on considère les quatre milliards d'années de l'histoire de la planète Terre, le fait que l'eau liquide semble avoir existé en quantité sur sa surface il y a plus de trois milliards d'années, quand le Soleil devait être plus faible qu'aujourd'hui ($S < 1\,000 \text{ Wm}^{-2}$?), s'explique presque certainement par un effet de serre nettement plus fort.

3. Les forçages anthropiques. – Les activités humaines n'ont aucun effet sur le Soleil, mais elles perturbent l'albédo α et l'effet de serre g . On sait calculer avec confiance le renforcement de l'effet de serre qui correspond aux augmentations anthropiques observées dans les teneurs atmosphériques de CO_2 , de CH_4 , et d'autres gaz à molécules polyatomiques, ou celles qui sont attendues au cours des prochaines décennies. Avec la composition atmosphérique de 1750 comme référence, le forçage $\sigma T_0^4 \Delta g$ d'intensification de l'effet de serre a dépassé $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ en 2005, dont $1,7 \text{ Wm}^{-2}$ résultant de l'augmentation du CO_2 , le reste venant des augmentations anthropiques de CH_4 , N_2O , de l'ozone troposphérique, et de diverses halocarbures. L'importance relative des contributions des gaz autres que le CO_2 , pourtant très rares dans l'atmosphère (1,95 ppb pour le CH_4 et moins encore pour les autres), vient de la *non*-saturation de leurs bandes d'absorption. Le CO_2 ajouté depuis 1750 absorbe à des longueurs d'onde où le rayonnement était déjà fortement absorbé par ce gaz (fig. 6), mais les molécules ajoutées de CH_4 ou

d'autres constituants mineurs absorbent pour la plupart à des longueurs d'onde de la fenêtre de transparence de l'atmosphère. Pour ces gaz, chaque tonne ajoutée à l'atmosphère est des milliers de fois plus efficace dans le renforcement de l'effet de serre qu'une tonne supplémentaire de CO_2 . De plus, si, pour le CH_4 , le temps de résidence assez court limite la période pendant laquelle les molécules ajoutées renforcent l'effet de serre, d'autres gaz comme les halocarbures résident dans l'atmosphère aussi longtemps, voire plus, que du CO_2 ajouté. Quant à l'évolution du forçage au cours des décennies à venir, pour chaque scénario d'émissions de GES, on sait assez bien calculer l'évolution de leur teneur atmosphérique, sauf surprises dans les réactions de la biosphère et de l'océan. Le cas d'école équivalent au doublement du CO_2 atmosphérique donne un forçage de $+4 \text{ Wm}^{-2}$ de l'effet de serre, et pour plusieurs des scénarios d'émission, ce forçage sera atteint bien avant l'an 2100 et continuera de croître après.

Les activités humaines agissent aussi sur l'effet parasol, car les émissions encore croissantes du SO_2 engendrent des aérosols qui augmentent la réflexion vers l'espace et diminuent l'énergie solaire absorbée et convertie en chaleur au sol. Quant au sol lui-même, son exploitation modifie son albédo, là aussi dans le sens d'une augmentation lorsqu'on remplace la forêt par des champs cultivés ou des pâturages. Le calcul du forçage global $-(S_0/4) \Delta\alpha$ qui résulte de toutes ces modifications est beaucoup plus ardu que celui du forçage de l'effet de serre, car ce forçage global résulte de perturbations dépendant fortement de la saison, de la localisation géographique, et de la nature des aérosols plus ou moins présents selon les lieux. Pour l'année 2005 comparée à 1750, on estime que le forçage global direct des aérosols anthropiques se situe entre $-0,1$ et -1 Wm^{-2} , compensant partiellement le forçage positif de

l'effet de serre. Là où ces aérosols sont les plus abondants et l'intensification de l'effet parasol particulièrement forte, ils doivent agir dans le sens d'un refroidissement. Cependant, l'incertitude reste forte, et elle l'est encore plus pour d'autres types d'aérosols, en particulier ceux produits par la combustion de matière végétale avec la déforestation. Certains calculs donnent une contribution légèrement positive au forçage global (donc un réchauffement), d'autres le contraire. Ne sachant pas bien calculer le forçage parasol correspondant aux changements déjà (assez mal) observés, comment estimer son évolution future ? On pense cependant que les forçages futurs des aérosols, généralement négatifs, ne compenseront qu'une petite fraction du forçage positif dû au renforcement de l'effet de serre. En outre, les scénarios de réduction radicale des émissions anthropiques de SO_2 tendent à affaiblir et à rapprocher de zéro le forçage parasol négatif ($- 0,5 \text{ Wm}^{-2}$?) d'aujourd'hui, devant contribuer alors à l'apparition rapide d'un réchauffement jusqu'ici masqué.

III. – Les éléments de complexité

1. **Les forçages indirects.** – Produisant des aérosols qui diffusent la lumière solaire, les émissions anthropiques de SO_2 renforcent « directement » l'effet parasol. En plus de ce forçage radiatif direct des aérosols anthropiques, assez difficile à évaluer avec précision, les spécialistes évoquent un forçage « indirect » lié au fait que les gouttelettes d'eau liquide et des cristaux de glace des nuages se forment justement autour d'aérosols. Il faut de l'humidité pour former des nuages, mais cela ne suffit pas ; il faut aussi des particules agissant comme noyaux de condensation ou de gel. De

manière générale, des aérosols naturels jouent ce rôle. Cependant, pour une quantité d'humidité donnée, disponible pour former des nuages, la présence d'un supplément d'aérosols anthropiques peut conduire à former davantage de gouttelettes plus petites, renforçant la diffusion de la lumière. La pollution rend les nuages plus blancs ! Les spécialistes estiment qu'en 2005 (par rapport à 1750), le forçage *indirect* global se situerait entre $-0,2$ et -2 Wm^{-2} . Avec ce dernier chiffre, le renforcement total de l'effet parasol par les aérosols anthropiques aurait en grande partie compensé le renforcement anthropique de l'effet de serre. Cela reste un problème de recherche. De même en ce qui concerne les effets des particules émises par les réacteurs d'avions, qui produisent souvent des traînées visibles, parfois perdurant et devenant des cirrus envahissant le ciel. Une augmentation des cirrus peut renforcer l'effet parasol le jour, mais elle renforce davantage l'effet de serre de nuit comme de jour. Certains chercheurs estiment avoir détecté la disparition de cet effet pendant les trois jours d'arrêt du trafic aérien au-dessus du territoire américain après les attentats du 11 septembre 2001. Aujourd'hui, l'effet paraît infime ; mais faudra-t-il en tenir compte dans la conception des avions de demain ?

2. Le cycle de l'eau et ses rétroactions. – Que devient la vapeur d'eau produite – en quantité comparable au dioxyde de carbone – lors de la combustion d'hydrocarbures ? La vapeur d'eau étant le premier gaz à effet de serre, sa production ne contribue-t-elle pas au forçage infrarouge, au renforcement de l'effet de serre ? En fait, non. Environ la moitié du CO_2 ajouté s'accumule dans l'atmosphère ; le flux croissant dû à la combustion de carburants fossiles s'approche déjà de 10 % des flux naturels d'échanges de CO_2 entre l'atmosphère, l'océan et la biosphère. En revanche, les

quelques milliards de tonnes de vapeur d'eau produites chaque année par la combustion d'hydrocarbures restent tout à fait négligeables à côté des flux naturels de 500 000 milliards de tonnes par an dans le cycle de l'eau ([fig. 7](#)). Il existe une exception possible à cet argument : le cas de la vapeur d'eau produite par la combustion de kérosène par les avions volant dans la stratosphère. En effet, l'addition d'H₂O à l'air très sec de ces altitudes pourrait à terme devenir significative, d'autant plus que son temps de résidence dans ces couches stables pourrait ne pas être court.

Au regard des décennies et siècles de résidence du CO₂ dans l'atmosphère, l'eau, avec un temps de résidence de neuf *jours*, ne fait que passer. Même à l'échelle locale, par exemple, en aval d'une centrale thermique brûlant du gaz naturel (CH₄), la *production* de deux molécules H₂O pour une molécule CO₂ n'a pas d'incidence pratique. En revanche, l'utilisation de l'eau pour le refroidissement des turbines entraîne souvent l'apparition de panaches de « vapeur », fines gouttelettes d'eau qui se condensent à partir du *gaz* vapeur d'eau lorsque celui-ci (chaud) entre en contact avec l'air ambiant moins chaud. Ce phénomène s'observe tout autant près d'une centrale nucléaire, qui ne produit ni CO₂ ni H₂O, mais dont une part importante (plus de 50 % !) de la production énergétique est de la chaleur perdue.

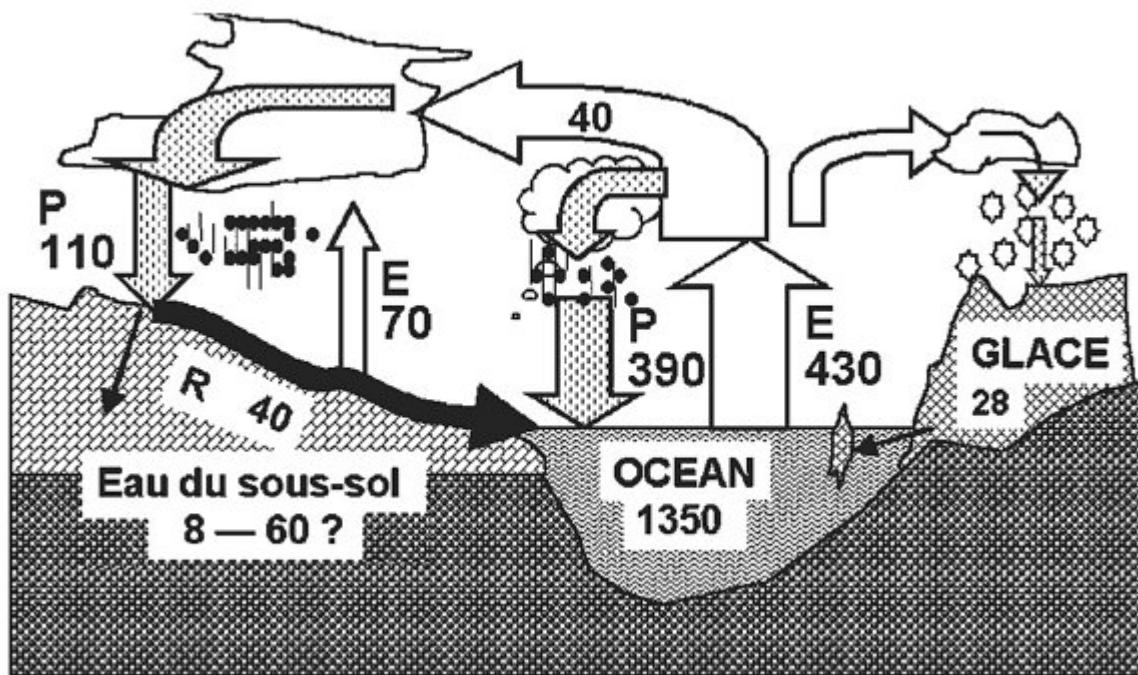


Fig. 7. – Le cycle de l'eau. Les stocks d'eau dans les différents réservoirs sont donnés en millions de milliards de tonnes, les flux d'eau entre ces réservoirs (évaporation E, précipitation P, ruissellement R) en milliers de milliards de tonnes par an. À noter que la quasi-totalité de l'eau atmosphérique ($13\,000\text{ km}^3$, soit l'équivalent de 26 mm d'eau liquide) existe à l'état gazeux (vapeur d'eau) ; la quantité (mal connue) d'eau liquide et solide présente dans les nuages représente peut-être 0,5 % de celle-ci.

Les émissions de vapeur d'eau créée par la combustion d'hydrocarbures ne jouent donc qu'un rôle négligeable dans le *forçage* de changement. En revanche, le fait qu'une augmentation de la température de l'air accroisse la valeur de la tension saturante de la vapeur d'eau et tende ainsi à favoriser sa phase gazeuse, suggère l'existence d'une *rétroaction positive* amplifiant la sensibilité du climat à toute perturbation. Une atmosphère plus chaude *peut* contenir davantage de vapeur d'eau ; si elle en contient davantage *dans les faits*, l'effet de serre des molécules H_2O sera intensifié, le

réchauffement aussi. Les premiers calculs des années 1960 donnaient une sensibilité climatique doublée quand on supposait que l'humidité *relative* allait rester constante, car dans ce cas l'humidité absolue augmenterait avec un réchauffement. De la même façon, refroidir l'atmosphère, comme aux périodes glaciaires, diminue nécessairement la quantité de vapeur d'eau qu'elle contient, réduisant l'effet de serre et amplifiant le refroidissement.

Cette rétroaction « vapeur d'eau » fonctionne bien comme une rétroaction positive. En analysant les mesures de rayonnement micro-ondes (non affecté par les nuages) à partir des satellites météorologiques américains depuis 1978, on a bien trouvé que la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère a augmenté avec le réchauffement, non seulement près de la surface mais également en altitude. Dans le modèle à dimension zéro, on peut rétablir l'équilibre dans l'équation (2) avec un réchauffement (refroidissement) ΔT tel que :

$$4\Delta T/T_0 = \Delta S/S_0 - \Delta\alpha/(1 - \alpha_0) + \Delta g/(1 - g_0) \quad (3)$$

Mais dans le cas de l'intensification de l'effet de serre par l'augmentation du CO_2 , le terme $\Delta g/(1 - g_0)$ doit alors inclure, en *plus* du *forçage* imposé par cette augmentation, une intensification supplémentaire de l'effet de serre due à la contribution accrue de la vapeur d'eau. Cette rétroaction opère pour *tout* forçage : par exemple si le Soleil devient plus brillant ($\Delta S > 0$), il apparaîtra un $\Delta g > 0$; de même, si une éruption volcanique impose une augmentation $\Delta\alpha > 0$ et un forçage négatif $-\Delta\alpha/(1 - \alpha_0)$, il en résulte un refroidissement et une *réduction* de la quantité de vapeur d'eau, donc un affaiblissement $\Delta g < 0$ de l'effet de serre.

En fait, le problème est loin d'être aussi simple que ne pourrait le laisser croire le modèle à dimension zéro (fig. 5). Dans le système climatique réel, la répartition de la vapeur d'eau en fonction de

l'altitude, qui affecte fortement le rayonnement infrarouge vers l'espace, dépend du lieu et de la saison. La circulation de l'atmosphère et les courants des océans transportent de la chaleur des zones des basses latitudes où beaucoup d'énergie solaire est absorbée, vers les latitudes plus élevées, notamment dans l'hémisphère hivernal où la perte dans l'infrarouge vers l'espace excède largement les faibles gains d'énergie solaire.

Aucune rétroaction n'est possible sur le terme de variation solaire $\Delta S/S_0$, mais le terme parasol $-\Delta\alpha/(1 - \alpha_0)$ contient une rétroaction puisque les surfaces couvertes de glace et de neige changent avec la température. Si effectivement la glace de mer (sur l'Arctique ou autour de l'Antarctique) s'amointrit ou disparaît avec un réchauffement, l'albédo α peut diminuer fortement, et dans la mesure où cette diminution survient pendant l'été, cela donne une rétroaction positive. La diminution de l'albédo augmente l'absorption d'énergie solaire dans le cas d'un réchauffement, le contraire dans le cas d'un refroidissement. Il en est de même pour la persistance ou non de la neige sur les continents en été. Il faut cependant remarquer que ce raisonnement un peu simpliste ne s'applique qu'aux cas où le ciel reste clair. Pour les régions ennuagées, la présence ou non de glace et de neige va moins changer l'absorption d'énergie solaire.

Revenons donc aux nuages. Pour le climat du présent, les nuages contribuent plus fortement à l'effet parasol (-50 Wm^{-2}) qu'à l'effet de serre ($+30 \text{ Wm}^{-2}$). Même si cela reste vrai dans l'avenir, cela ne garantit pas que la rétroaction globale des nuages sera négative, donc stabilisatrice. On peut imaginer, mais cela ne va pas de soi, qu'un réchauffement conduise à une augmentation de l'humidité atmosphérique, et s'il renforce l'évaporation, cela implique nécessairement une intensification globale des précipitations, et

aussi, *peut-être*, une augmentation de la couverture nuageuse et de sa contribution à l'effet parasol. Toutefois, une telle augmentation ne contribue à renforcer l'effet parasol que dans la mesure où elle apparaît de jour, surtout aux latitudes bien éclairées. Une augmentation de la couverture nuageuse au-dessus des océans, qui eux absorbent beaucoup la lumière solaire, aura beaucoup plus d'effet que l'apparition de nuages au-dessus des surfaces claires des déserts. En outre, il ne faut pas oublier que les nuages, tout particulièrement les nuages élevés, contribuent aussi à l'effet de serre, de nuit comme de jour, en hiver polaire comme en été ou dans les tropiques. Avec le changement climatique, ces contributions doivent varier. Si, avec un réchauffement, l'effet de serre des nuages se renforce plus que leur effet parasol, par exemple si les nuages élevés (notamment les cirrus) s'étendent beaucoup et la couverture de nuages bas sur l'océan diminue, leur rétroaction globale sera *positive*, le réchauffement *amplifié*. Si au contraire, la surface couverte par les cirrus rétrécit et la couverture des nuages bas augmente, l'effet parasol gagnera du terrain, et la rétroaction globale sera *négative*, *limitant l'ampleur* du réchauffement. Ces rétroactions s'appliquent de manière symétrique à un refroidissement. Mais aujourd'hui on ne sait pas calculer avec confiance comment les nuages vont changer. Le facteur critique semble résider dans la réaction des nuages bas sur les océans des zones tropicales et subtropicales, car ces nuages réfléchissent beaucoup mieux que l'océan sans nuages l'ensoleillement abondant, sans modifier sensiblement l'émission vers l'espace du rayonnement infrarouge. Cependant, bien que l'on dispose maintenant de plus de trente ans d'observation systématique des nuages depuis les satellites, années au cours desquelles le climat s'est nettement réchauffé, on n'a pu

dégager de tendance nette se démarquant des fortes fluctuations interannuelles de la couverture nuageuse.

Dans l'ensemble, les variations des climats de la Terre ne semblent jamais avoir dépassé certaines limites. La planète n'a jamais perdu son eau, dont une grande partie est toujours restée liquide ; elle n'a presque jamais été totalement couverte de glace¹. L'astrophysique nous apprend que la luminosité du Soleil a dû augmenter (de 40 % ?) au cours des dernières quatre milliards d'années. Pendant la plus grande partie de cette période, la quantité de CO₂ dans l'atmosphère a *diminué*, entraînant une réduction de l'effet de serre qui a compensé, en partie au moins, les conséquences de l'augmentation de la luminosité solaire. Même si les différentes rétroactions du cycle de l'eau sur l'effet de serre et l'effet parasol opèrent dans l'ensemble comme des rétroactions positives, augmentant la sensibilité du climat aux perturbations, le système reste globalement stable à cause de la rétroaction négative du rayonnement thermique. Cela restera-t-il vrai avec le renforcement anthropique de l'effet de serre ? Certains évoquent l'emballement de l'effet de serre qui a fait monter à 750 °C la température à la surface de Vénus, où l'atmosphère a perdu tout son H₂O mais contient une grande masse de CO₂. Le réchauffement de la Terre pourrait-il conduire à la libération des carbonates aujourd'hui enfermés dans les sédiments, ce qui mettrait énormément de CO₂ dans l'atmosphère ? Les calculs laissent penser que cela est à craindre – mais pas avant quelques milliards d'années, quand le Soleil sera devenu sensiblement plus lumineux qu'aujourd'hui. Sans crier à la catastrophe imminente, on doit se préoccuper des problèmes bien plus immédiats soulevés par l'altération anthropique de l'atmosphère terrestre.

3. Les forçages solaires. – Nul doute qu'une variation de la « constante » solaire agit comme forçage de changement climatique. L'évolution de l'atmosphère de la planète aurait contré le forçage dû à l'évolution nucléaire du Soleil depuis quatre milliards d'années. Toutefois, si l'énergie du Soleil vient de la fusion thermonucléaire dans son cœur, sa luminosité dépend du transport de ce flux d'énergie jusqu'à son enveloppe extérieure, d'où part son rayonnement. Les mouvements convectifs qui assurent une partie de ce transport peuvent-ils varier ? De telles variations pourraient-elles entraîner des fluctuations faibles du Soleil sur des échelles de temps allant de quelques décennies à quelques siècles ? En effet, des variations de 0,5 % pourraient expliquer certaines variations historiques du climat. Mais il n'existe pas de théorie suffisamment fine de la structure de la zone convective du Soleil, et il n'existe pas non plus de mesures suffisamment précises de la constante solaire avant 1970. La variation cyclique de 0,1 % observée avec la même période (onze ans) que le cycle de taches est trop rapide et trop faible pour avoir une influence significative sur le climat. Quelques chercheurs essaient d'utiliser les mesures historiques du nombre de taches et d'autres indices d'activité solaire pour estimer comment la constante solaire a pu varier avant le xx^e siècle, mais ces reconstructions restent incertaines.

Même si le cycle de l'activité solaire n'affecte guère la constante solaire S , il se manifeste par des variations dans le rayonnement ultraviolet et les émissions de particules chargées. De plus, les structures des champs magnétiques solaire et interplanétaire varient selon une période de vingt-deux ans.

Ces variations affectent la haute atmosphère terrestre, modifiant fortement la température de la thermosphère ([fig. 8](#)). En outre, le flux de rayons cosmiques arrivant à l'orbite de la Terre varie selon la

force du « vent solaire ». Toutefois, sauf vers les pôles, le champ magnétique terrestre empêche ces particules chargées de pénétrer dans l'atmosphère.

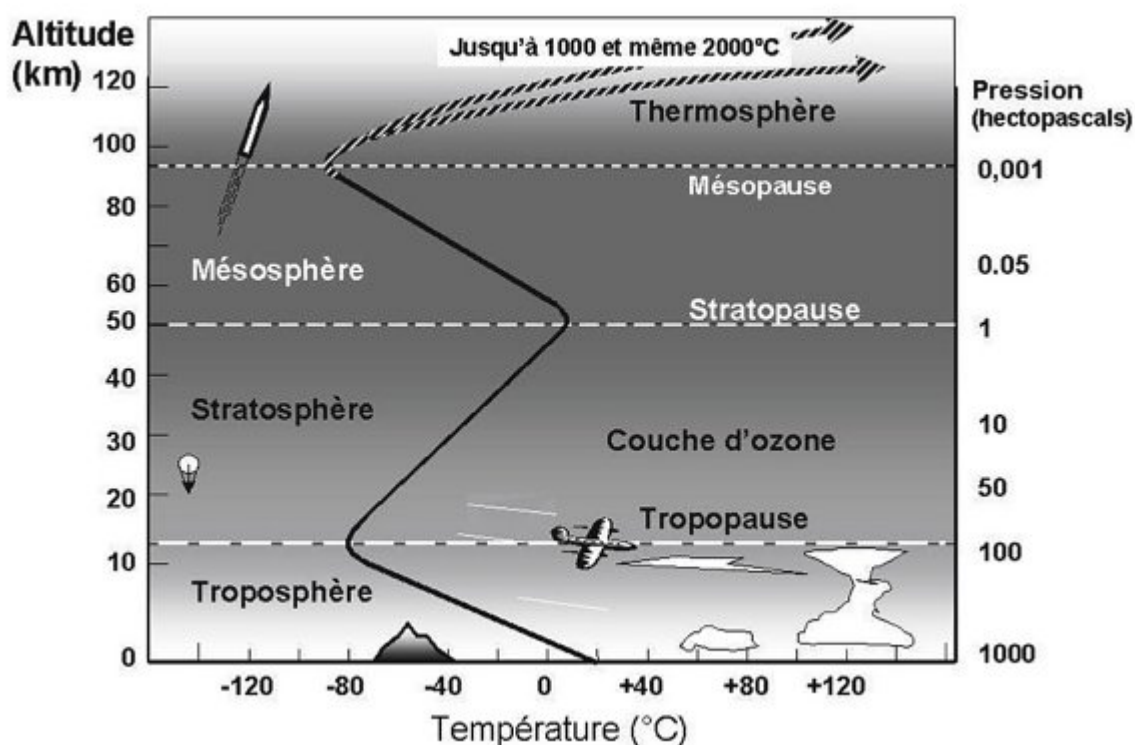


Fig. 8. – **Structure verticale de l'atmosphère terrestre.**

Quelques spécialistes des relations Soleil-Terre soutiennent que l'activité solaire a une influence sensible sur le climat, non pas par des variations significatives de la constante solaire S , mais par des mécanismes plus subtils. En plus des variations cycliques de onze et de vingt-deux ans, il existe des variations irrégulières sur de plus longues échelles de temps, et l'on a depuis longtemps cherché, et (trop ?) souvent trouvé, des corrélations entre certaines de ces variations et les variations historiques du climat.

Ces arguments statistiques sont peu convaincants, fondés comme ils le sont sur des corrélations non durables et des séries de courte durée, et non sur une compréhension des mécanismes en jeu. On voit difficilement comment ces variations affectent la troposphère, qui est le véritable théâtre de la météorologie et du climat. Il est vrai, toutefois, que les conditions régnant dans la stratosphère influent sur la propagation des perturbations (ondes planétaires) et donc sur les transports d'énergie et d'eau dans la troposphère, et on sait aussi que les variations du rayonnement ultraviolet solaire affectent les températures stratosphériques. Quelques chercheurs ont proposé d'autres mécanismes d'influence par l'intermédiaire de particules chargées qui agiraient comme noyaux de condensation et de gel, modifiant les propriétés des nuages. Ce serait donc un forçage indirect de l'activité solaire ou des champs magnétiques interplanétaire et terrestre. Pour ces chercheurs, une partie majeure du réchauffement climatique récent serait due à ce forçage et non à celui du renforcement anthropique de l'effet de serre. Toutefois, ils ne tiennent pas compte du fait que les particules chargées affectent surtout les hautes couches de l'atmosphère polaire, où les nuages contribuent davantage à l'effet de serre qu'à l'effet parasol, ce qui renverse leur argument. De manière générale, les « découvertes » répétées du rôle de l'activité solaire dans les variations climatiques me rappellent plutôt les témoignages d'apparitions du monstre de Loch Ness, et trahissent une tendance à trouver le rôle du Soleil prééminent dans tout, tendance encouragée ces dernières années par la volonté des lobbies des énergies fossiles à trouver le fautif du réchauffement dans notre astre plutôt qu'en nous-mêmes.

4. **La variabilité interne.** – En cherchant à expliquer les changements climatiques déjà observés, il ne faut pas oublier que le

système climatique peut varier sans qu'il y ait de cause externe à trouver. Depuis des milliers d'années au moins, El Niño et La Niña se succèdent sur le bassin du Pacifique, typiquement une ou deux fois par décennie, sans que cette Oscillation australe ne soit provoquée par autre chose qu'un jeu de bascule dans les échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère. La complexité du système climatique fournit de nombreuses possibilités de variations non forcées, car si l'atmosphère réagit très vite aux conditions qui lui sont imposées, les échelles de temps gouvernant l'océan, les glaces, et la végétation vont de quelques mois à des millénaires. Il faut environ mille ans pour mélanger complètement l'océan, qui peut stocker et déstocker de la chaleur pendant des siècles. L'équilibre entre l'océan et l'atmosphère peut ne jamais se réaliser. Les propriétés de l'oscillation de l'Atlantique Nord dépendent sans doute des échanges de chaleur et de sel entre l'eau et les glaces de mer, des échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère. Ceux qui voudraient que *toute* variation terrestre soit provoquée par une variation externe à la planète devraient se demander ce qui causerait alors ces variations externes.

IV. – Vers la simulation de la Terre ?

1. **Les débuts.** – La modélisation du climat se fonde sur la formulation mathématique des principes physiques qui gouvernent les processus en interaction dans le système combiné de continents, glaces, océans, et atmosphère. Dans le modèle de dimension zéro, on utilise la température moyenne à la surface du globe comme *paramètre* de l'état climatique, et on identifie trois facteurs de contrôle global du climat, Soleil, parasol, et serre, sans faire de

distinction entre l'atmosphère, l'océan, et les surfaces émergées. Ceci reste évidemment une *caricature* d'une réalité autrement complexe. Chaque lieu sur la Terre a son climat avec ses variations annuelle et diurne, et ce climat dépend non seulement des facteurs globaux mais aussi de la latitude et de l'altitude du lieu, de la proximité et la direction de la mer ainsi que des massifs montagneux, de la topographie locale, et de la couverture végétale régionale. Mais celle-ci dépend à son tour du climat.

Les scientifiques ont procédé en plusieurs étapes dans la prise en compte de cette complexité, et ce bien avant le développement de calculateurs électroniques. La connaissance du fait que le climat dépend de la latitude remonte à l'Antiquité, et le mot *climat* vient justement du mot grec *klima* pour l'inclinaison des rayons solaires. Cette dépendance a été prise explicitement en compte dès 1920 par le Serbe Milutin Milankovitch dans son étude du rôle des variations des paramètres de l'orbite et de la rotation de la Terre dans les grands changements climatiques. Ces variations modifient la répartition de l'insolation avec les latitudes et les saisons sans qu'il y ait pour autant une variation de la constante solaire. Des modèles à une dimension – la latitude – permettent de prendre en compte ces forçages subtils et de quantifier la rétroaction glace-albédo de manière un peu réaliste. Représentant l'albédo et le rayonnement infrarouge vers l'espace en fonction de la latitude et de la chaleur qui y règne, on calcule cette température en tenant compte du bilan de l'énergie solaire absorbée, du flux infrarouge perdu, et des transports de chaleur de l'équateur vers les pôles. D'autres types de modèles à une dimension – la *verticale* – permettent d'étudier de façon quantitative, quoique encore schématisée, comment fonctionnent l'effet de serre et la rétroaction de la vapeur d'eau. Dans ces modèles, on ne peut tenir compte explicitement ni des

transports d'énergie de l'équateur vers les pôles ni des autres mouvements horizontaux de l'atmosphère, et on représente les flux verticaux de chaleur latente et de chaleur sensible en moyenne horizontale. On étudie le transport vertical d'énergie dans le rayonnement infrarouge, ce qui est au cœur de l'effet de serre, en moyennant horizontalement sur des champs d'humidité très variables. De même pour la contribution des nuages et à l'effet parasol et à l'effet de serre, alors que l'on sait que la couverture nuageuse varie énormément sur la surface du globe.

2. Les modèles en trois dimensions. – L'autre voie de la modélisation du climat aborde directement les processus météorologiques tels qu'ils se déroulent dans les trois dimensions. Ce qui se passe en un lieu dépend des apports et des pertes d'énergie *et d'eau*, non seulement de et vers le haut, non seulement du nord ou du sud, mais aussi de l'est et de l'ouest. On écrit les équations de conservation de l'énergie et de la matière, ainsi que les équations qui gouvernent les mouvements de l'atmosphère. Si l'on connaît les conditions aux limites et les conditions initiales, on peut en principe calculer l'évolution du système. Pour ces limites, on sait ce que vaut le rayonnement solaire descendant à chaque latitude, longitude, date et heure, au « sommet » de l'atmosphère, et on sait aussi que le rayonnement infrarouge descendant de l'espace vaut pratiquement zéro. À la limite inférieure de l'atmosphère interviennent les propriétés des surfaces : mer ou terre, altitude, albédo et émissivité, rugosité, humidité, etc. Pour les conditions initiales, on utilise ce qui est observé à un moment donné. Les grands centres de prévision des services météorologiques nationaux (et le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme) analysent et intègrent les observations fournies par le réseau

mondial de stations météorologiques, complétées par les mesures satellitaires.

La résolution des équations nécessite le calcul numérique. Il faut organiser en séries discrètes les dimensions spatiales et temporelles, c'est-à-dire mettre une grille sur la Terre² et découper l'atmosphère en tranches, ce qui donne un grand nombre de cellules atmosphériques, et calculer l'évolution avec un laps de temps fini. Commenant à l'instant t avec les valeurs des grandeurs physiques (température, pression, vitesse du vent, humidité, etc.) dans chacune des cellules, on calcule leurs valeurs à l'instant $t + \Delta t$, en tenant compte des entrées et sorties d'énergie, de quantité de mouvements, d'eau, et de rayonnements solaire et infrarouge. Ainsi fait-on la prévision numérique, déterministe, du temps. La réalisation pratique de ce type de prévision, envisagée dès 1923 par le météorologue anglais Lewis Fry Richardson, ne devint possible que dans les années 1960 avec le développement d'une part de *méthodes* mathématiques permettant d'éviter les instabilités numériques, d'autre part des *outils* de calcul rapide et de gestion de nombres que sont les ordinateurs.

La prévision numérique du temps avec les modèles de circulation générale (MCG) se fonde donc sur les lois bien établies de la physique et non sur une simple extrapolation de tendances observées. On emploie ces mêmes modèles, avec quelques aménagements, pour étudier la sensibilité et l'évolution du climat, faisant l'hypothèse que même si les phénomènes de chaos – les imprécisions des données initiales, les petites erreurs d'arrondi dans les calculs, bref, « l'effet papillon » – font que les prévisions déraillent au bout d'une dizaine de jours, les *statistiques* des variations ainsi calculées correspondent bien au climat, donnant non seulement de bonnes valeurs moyennes mais aussi un bon

échantillon des fluctuations probables autour de ces moyennes. Les MCG reproduisent en partie la complexité de la nature : structure en trois dimensions de l'atmosphère, existence de l'eau dans ses trois formes, non-uniformité de l'illumination par le Soleil, hétérogénéité de la surface du globe. Les limites de l'observation autant que celles de la puissance de calcul nécessitent cependant des schématisations : pour étudier le climat, il faut étudier *tout* le globe, mais on ne peut penser suivre chaque mètre cube d'air. Pour la plupart, les MCG employés pour la recherche climatique travaillent avec des cellules faisant typiquement une centaine de kilomètres de côté et un kilomètre d'épaisseur, ce qui donne un million de cellules pour l'atmosphère terrestre, avec dans chacune une dizaine de grandeurs physiques à suivre. Il faut cependant représenter ce qui se passe à l'*intérieur* des cellules, aux échelles inférieures à celles de la maille, parfois à des échelles microscopiques, avec des formules simplifiées – les *paramétrisations*. Il en est ainsi pour l'évaporation de l'eau à partir du couvert végétal, la condensation de l'eau autour d'aérosols pour former des nuages et des précipitations, le partage de l'eau précipitée entre l'infiltration, l'évapotranspiration, et le ruissellement, la résistance de la végétation et du relief aux mouvements de l'air, la diffusion du rayonnement solaire et l'absorption et l'émission de rayonnement infrarouge par des nuages hétérogènes qui ne remplissent pas la cellule. Les prévisions de l'évolution de la couverture nuageuse et de la répartition locale des précipitations, qui dépendent fortement de ces paramétrisations, réussissent généralement moins bien que celles de la variation de la pression atmosphérique et des mouvements des grands systèmes. Et si les divers modèles climatiques donnent des résultats discordants pour l'évolution du climat avec le renforcement de l'effet de serre, c'est largement à cause des différences dans les

paramétrisations. Et si les équipes de recherche emploient des paramétrisations différentes et discordantes, c'est parce qu'il n'existe pas encore assez de mesures pour dire laquelle est bonne et lesquelles sont mauvaises. Un exemple : bien que certaines informations aient été acquises par des mesures ponctuelles, on connaît très mal les quantités d'eau liquide et de glace dans les différents types de nuages selon les régions du globe, ou la manière dont les augmentations des aérosols de sulfates modifient la taille des gouttes. Autre exemple : comment représenter le rôle des mouvements verticaux.

3. Complexité et incertitude : la convection. – Le transport vertical d'énergie dans l'atmosphère n'est pas uniquement radiatif, il faut tenir compte de la convection. Dans le monde réel, et en particulier au niveau des tropiques, il s'agit d'un phénomène aussi important que le rayonnement. La convection transporte l'eau de sa source et la distribue dans l'atmosphère : sans convection, il n'y aurait pas de vapeur d'eau dans l'atmosphère, or la vapeur d'eau a un effet majeur sur le rayonnement, ce qui crée une situation intéressante d'interaction à double-sens, explorée dans le modèle radiatif-convectif du chercheur américain Kerry Emanuel (MIT). Lors de l'ascendance adiabatique des parcelles d'air, une part de la vapeur d'eau se mélange à l'air environnant, créant différents mélanges qui vont soit s'élever, soit rester sur place, soit avoir un mouvement descendant, en fonction de la poussée d'Archimède s'exerçant sur eux. Dans les mélanges avec des parcelles d'air ascendantes, la vapeur d'eau peut continuer à se condenser et créer un condensât adiabatique modifiant les propriétés de l'environnement. Le modèle de Kerry Emanuel présente également une descente insaturée, qui correspond à une subsidence d'air mû par le refroidissement causé par la réévaporation d'une part de la

précipitation tombant dans un environnement sous-saturé. Cette descente insaturée récolte toute l'eau condensée précipitante composée de la colonne adiabatique et des mélanges, et correspond à une partie passant à travers le nuage avec un air saturé et à une partie à l'extérieur du nuage avec de l'air environnant. La descente d'air insaturée contient à la fois la précipitation, dont une part tombe du nuage et se réévapore de façon partielle, ainsi qu'une vapeur d'eau spécifique de descente.

4. **Les océans.** – De toute façon, les modèles de circulation générale de l'atmosphère ne suffisent pas pour calculer la sensibilité et l'évolution du climat. Il faut aussi tenir compte des échanges de chaleur avec l'océan, et donc il faut coupler au modèle atmosphérique un modèle de l'océan. Comme pour l'atmosphère, il s'agit d'appliquer les lois de la physique, de suivre la circulation de masses d'eau plus ou moins froides, plus ou moins salées, plus ou moins denses. Ce n'est qu'avec le couplage des modèles que l'on peut espérer prévoir comment le renforcement de l'effet de serre et le réchauffement global affecteront les phases El Niño et La Niña de l'Oscillation australe. Pour l'Atlantique Nord, l'Arctique, et l'océan Austral, le modèle doit tenir compte de la conservation de sel lorsqu'il y a formation ou fonte de glaces de mer. Un arrêt brutal de la formation d'eaux profondes en mer de Norvège, réduisant le flux de chaleur dans la dérive des eaux vers le nord, ne pourrait-il conduire à un refroidissement sévère en Europe malgré la poursuite du réchauffement global ? Finalement, si le climat change, la végétation aussi changera, et il faut alors modéliser ces réactions de la biosphère, et ses rétroactions sur le cycle de l'eau et sur l'atmosphère, donc développer des modèles couplant l'atmosphère, les océans, les glaces, et la biosphère. Les chercheurs japonais ont

commencé à atteler leurs super-ordinateurs à cette *simulation de la Terre*. Vaste programme.

CHAPITRE III

La climatologie entre passé, présent et futur

I. – Climats et changement climatique

1. **Le climat, aspect permanent de la météorologie.** – Par contraste avec la météorologie, faite de changements éphémères, on reconnut dès l'Antiquité certains aspects du ciel, moins prévisibles que les mouvements des astres, aspects quasi permanents résumés dans le *climat*. Sans pouvoir prédire les tempêtes en Méditerranée, les voyageurs grecs savaient qu'il faisait plus chaud à Assouan qu'à Athènes, qu'ils avaient plus de chances d'avoir chaud en juillet qu'en décembre à Marseille, mais moins d'avoir de la pluie. Le climat représente une certaine constance dans le changement, le retour du printemps après l'hiver, de l'automne après l'été. Mais aujourd'hui le climat change, la Terre se réchauffe. Entre 1910 et 2000, la température moyenne à la surface du globe a augmenté d'environ 0,7 °C. S'agit-il d'années exceptionnelles ? Pour faire une comparaison plus rigoureuse, les climatologues travaillent avec des périodes de trente ans ; ce qui donne un réchauffement proche de 0,5 °C entre les trente années qui ont conclu le XIX^e siècle

(1871-1900) et la fin du xx^e siècle (1971-2000). La variation de la température (fig. 9) comporte ses hésitations, mais ce réchauffement se démarque des fluctuations climatiques depuis l'an mil.

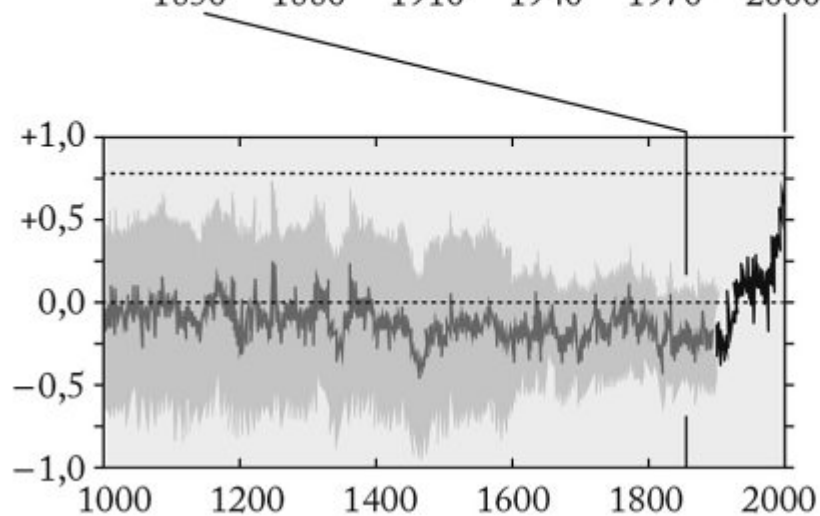
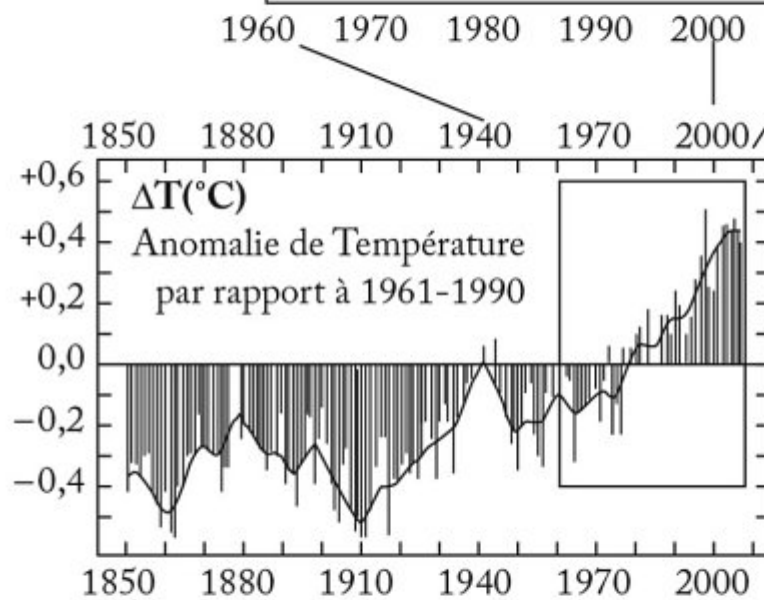
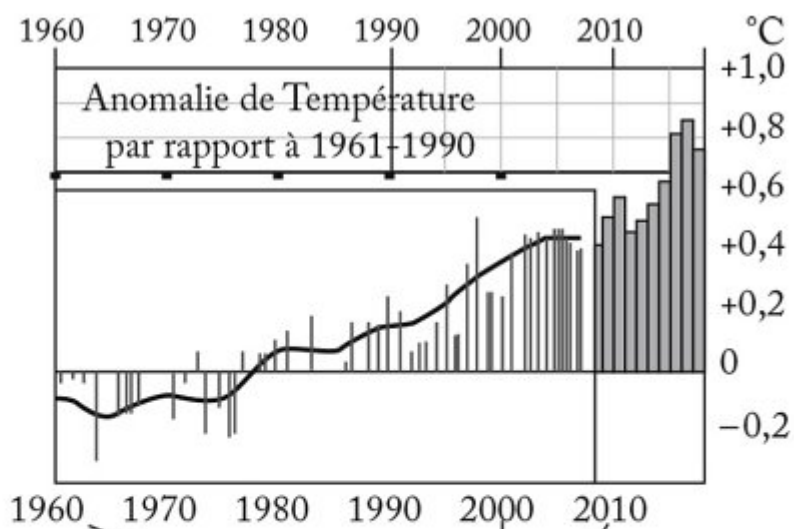


Fig. 9. – Le réchauffement global : anomalies de la température moyenne à la surface du globe. En bas, anomalies pour l'hémisphère Nord depuis l'an mil, sur la base de données instrumentales depuis 1902 et de reconstructions de la période antérieure à partir d'indices variés. Au milieu, la période de 1860 à 2008 (moyennes annuelles et lissage sur dix ans, d'après le Hadley Centre – UK Met Office), sur la base des relevés des stations météorologiques et des navires. En haut, le réchauffement depuis 1960, d'après les compilations de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Peut-on cependant attribuer la totalité de ce réchauffement à l'enrichissement anthropique de l'atmosphère (fig. 2) en GES ? En fait, on explique difficilement le réchauffement de 1910 à 1940 sans faire appel soit à la variabilité interne du système, soit à des forçages naturels. On considère en particulier un affaiblissement léger de l'effet parasol, lié à une accalmie de l'activité volcanique, complété peut-être par une petite augmentation (0,1 % ?) de la constante solaire.

2. La géographie des climats. – Aussi utile que puisse être un paramètre planétaire – la température moyenne à la surface du globe – pour suivre le réchauffement, cela reste une caricature. Sans considérer des microclimats, pourtant bien réels, il faut au moins tenir compte du fait que les climats dépendent de la géographie et qu'ils comprennent les cycles annuels et diurnes. Caractéristique remarquable du réchauffement récent sur les continents : les nuits se réchauffent plus que les jours. En France, au cours du xx^e siècle, les températures minimales – généralement celles qui précèdent le lever du Soleil – ont augmenté de plus de 1 °C sur les trois quarts du territoire, alors que l'augmentation des températures maximales n'a pas dépassé 0,5 °C sur la moitié Nord, et 0,9 °C dans le Midi. Mais il n'est pas sûr que cette tendance soit générale, ni qu'elle se maintienne, et il est certain que le cycle diurne

des températures dépend fortement de celui de la couverture nuageuse.

La carte des températures moyennes pour un mois donné ne représente qu'un aspect limité du climat, car certaines régions connaissent des variations très fortes autour de ces moyennes. De toute façon, les températures ne suffisent pas pour définir les conditions qui permettent l'épanouissement de tel ou tel écosystème. L'eau est un facteur au moins aussi important. Comme pour les températures, les pluies varient énormément autour de la Terre et en fonction des saisons. Cette répartition dépend en partie de la topographie ; en interaction avec celle-ci et avec l'évaporation qui renvoie l'eau vers l'atmosphère, elle détermine la carte du ruissellement, donc de l'eau douce essentielle pour la vie sur les terres. Celle-ci dépend du transfert vers les continents ([fig. 7](#)) de 40 000 milliards de tonnes d'eau évaporée des océans chaque année, mais elle dépend aussi du recyclage des précipitations au-dessus des terres par l'évapotranspiration. De nombreux chercheurs pensent que le cycle hydrologique *global* va s'intensifier avec le réchauffement. Les variations des précipitations laissent soupçonner une tendance à l'augmentation, pour l'*ensemble* des terres, de 2,4 % au cours du xx^e siècle, mais avec des fluctuations de 4 % en plus ou en moins pendant certaines décennies, et des fluctuations régionales plus fortes encore. Au Sahel ouest-africain, les sécheresses prolongées des années 1970 et 1980 ont succédé aux pluies moins rares des années 1950. Quant à la phase solide de l'eau, presque tous les glaciers de montagne dans le monde ont reculé au cours du xx^e siècle.

II. – Des observations locales vers la moyenne globale, la réalité du réchauffement

1. Vers une couverture globale. – La température moyenne à la surface du globe ne se mesure pas ; elle se calcule à partir de mesures nécessairement *locales* de la température. Or, si quelques scientifiques, à l'instar de Blaise Pascal, ont établi des réseaux informels de mesures en Europe dès le ^{xvii}^e siècle, si les marins ont très tôt consigné leurs observations sur un livre de bord, l'institution de services météorologiques nationaux ne remonte qu'au ^{xix}^e siècle. Même aujourd'hui, les stations météorologiques sont inégalement réparties sur le globe, et dans beaucoup des pays du tiers-monde, la qualité des mesures a plutôt baissé avec le départ des puissances coloniales. Seuls les pays riches entretiennent encore des bateaux météorologiques, service pénible pour les marins et très coûteux, en voie de disparition, les pays préférant se reposer sur les données satellitaires. Les navires de commerce fournissent des mesures de qualité, mais elles concernent surtout les voies maritimes bien fréquentées, couvrant plus ou moins l'Atlantique, la Méditerranée, et le Pacifique Nord, beaucoup moins le Pacifique Sud, et encore moins l'océan Austral. De plus, les maîtres à bord cherchent généralement, et réussissent souvent, à éviter les tempêtes, de telle sorte que les mesures fournies sont sujettes à un « biais de beau temps » dont les climatologues doivent tenir compte en calculant les températures ou pressions moyennes. Les biais n'étaient pas les mêmes à l'époque de la marine à voile. Sans prévisions météorologiques, les navigateurs devaient choisir leur cap, cherchant les meilleurs vents même s'ils n'avaient guère envie de

rencontrer des tempêtes, sur la base de connaissances climatologiques imparfaites.

2. Sources de biais. – D'autres biais affectent les longues séries de mesures. Les archives de l'observatoire météorologique du parc Montsouris révèlent que la température de Paris a augmenté de près de 2 °C entre 1872 et 1972, *avant* le réchauffement récent. L'écart de température entre Paris et Chartres va en s'accroissant, et cette extension de l'île de chaleur urbaine est à distinguer du réchauffement global. Il faut prendre en compte ce phénomène, observé dans mainte agglomération, lorsqu'on cherche à établir la courbe de l'évolution de la température moyenne à l'échelle d'un pays ou du globe. Les climatologues statisticiens, tout sauf des naïfs, savent le faire. D'autres surprises attendent celui qui fouille dans les archives : la température donnée pour certaines villes a accusé une baisse notable lorsqu'on a déplacé la station météorologique du centre vers un aéroport hors de l'île de chaleur urbaine. Aujourd'hui l'urbanisation rattrape les aéroports et les températures remontent. D'autres difficultés surgissent dans l'analyse de la longue série de mesures des températures à la surface de la mer. À l'époque de la marine à voile, on mettait un thermomètre dans un seau en toile avec lequel on avait puisé l'eau de mer. Aujourd'hui on mesure la température à la prise d'eau pour le refroidissement des machines, à une profondeur qui ne correspond pas à celle échantillonnée par les seaux lancés autrefois depuis le pont.

La courbe de réchauffement ([fig. 9](#)) correspond à l'ensemble des mesures de surface compilées depuis 1860 et analysées en corrigeant au mieux les différents biais. La courbe de l'évolution depuis l'an mil repose sur des estimations indirectes des températures de surface (dans l'hémisphère Nord) – cernes annuels

de croissance des arbres, températures mesurées à différentes profondeurs dans des forages pour le pétrole, pour l'eau, pour l'exploration minière, pour la recherche géophysique dans les glaces ou dans l'écorce terrestre. Malgré l'intérêt et l'importance de ces estimations, il faut convenir que la climatologie observationnelle au sens moderne ne peut remonter bien loin dans le passé, surtout si l'on insiste sur une couverture de toute la Terre.

3. **Variabilité.** – Aujourd'hui, les climatologues donnent chaque année l'*anomalie* de la température moyenne à la surface du globe (l'écart par rapport à la moyenne d'une période de trente ans, par exemple, 1961-1990), ainsi que des cartes des anomalies régionales. Toutefois, pour certaines régions, par exemple sur une grande partie de l'océan Austral, le nombre d'observations au cours d'une seule année est trop faible pour donner un résultat statistiquement significatif ; il faut accumuler les données sur une décennie ou plus. De toute façon, l'examen de la carte des anomalies de température de l'année la plus chaude (1998) montre que le réchauffement possède une structure géographique marquée avec même un refroidissement dans certaines régions (le nord de la Sibérie autour de la *Novaya Zemlya* en 1998). On attribue une partie du réchauffement prononcé dans le Pacifique au large du Pérou et de l'Équateur à l'événement El Niño de 1997-1998. En revanche, les années 2001, 2002, 2003, et surtout 2005 et 2007, presque aussi chaudes globalement que 1998, l'ont été sans El Niño. En 2001, des anomalies supérieures à + 1 °C s'étendaient de l'Alaska au Labrador, et de l'Afrique du Nord et de l'Espagne à travers toute l'Europe, le Proche- et Moyen-Orient, l'Asie centrale, jusqu'à la Chine ; mais il faisait relativement frais en Australie. Et en 2003, des anomalies chaudes couvraient l'Europe occidentale et centrale, tout le Grand Nord, ainsi que l'ouest de l'Amérique du Nord, mais l'année

a été plutôt fraîche à l'est des États-Unis. Pas plus que cette structure géographique complexe, il ne faut oublier la variabilité d'un mois au suivant. En 2000, malgré un juillet très froid, la France a connu son année la plus chaude depuis le début des mesures, record battu à son tour en 2003, par la chaleur extrême de l'été malgré un octobre plutôt froid. En 2007, le printemps remarquablement chaud a encore donné en France une année chaude malgré un été jugé médiocre.

Tout en reconnaissant les difficultés multiples à déterminer la température moyenne à la surface du globe à partir d'observations d'un échantillon inégalement réparti de points sur cette surface, avec des effets perturbateurs et des biais qui ont changé au cours des années, et avec des techniques de mesure qui ont évolué, les climatologues dans leur très grande majorité conviennent de la réalité du réchauffement global depuis 1900. Le réchauffement assez rapide entre 1910 et 1945 est bien marqué sur la plus grande partie des continents ainsi que sur l'Atlantique Nord, l'océan Indien et (là où il existe assez de données) le Pacifique Nord. De 1946 à 1975, les températures diminuent sur l'hémisphère Nord (sauf de la Russie à l'Asie centrale). Certains pensent l'expliquer par un renforcement de l'effet parasol avec la croissance économique « sale » compensant dans l'hémisphère Nord l'intensification de l'effet de serre ; les températures ont continué à monter dans l'hémisphère Sud. À partir de 1976, les températures augmentent presque partout, des réchauffements rapides (de 0,6 à 1 °C par décennie) se déclarant sur les continents aux latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord.

4. Modes de variation. – Cette tendance au réchauffement généralisé depuis 1976 s'écarte nettement de la variabilité naturelle, et c'est seulement en tenant compte du renforcement anthropique

de l'effet de serre que les modèles du climat peuvent la simuler. Toutefois, il reste difficile d'interpréter les fluctuations plus ou moins fortes à l'échelle régionale, d'un mois à l'autre, d'une année à l'autre, et même d'une décennie à la suivante. Les inflexions de la courbe du réchauffement global depuis 1860 (fig. 9) ressemblent à la variation interdécennale de l'indice de l'oscillation de l'Atlantique Nord. Cet indice se calcule à partir de la différence de pressions atmosphériques à la surface de la mer entre l'Islande et Lisbonne. Ses variations sont corrélées avec de nombreux aspects de la météorologie autour de l'Atlantique Nord : déplacements des centres de hautes et de basses pressions, trajectoires des tempêtes, vigueur des vents d'ouest sur les moyennes latitudes et des vents alizés (d'est) plus au sud, distribution des pluies entre le nord et le sud de l'Europe. En effet, *tout* est mobile dans l'atmosphère. Le réchauffement global ne peut se restreindre à un simple réchauffement.

L'augmentation constatée de la température moyenne serait-elle alors en partie (ou entièrement) la manifestation de la variabilité naturelle des échanges d'énergie entre les glaces, les eaux et l'atmosphère, sans relation avec le renforcement de l'effet de serre ? Quelques-uns le pensent, mais de nombreux chercheurs explorent l'hypothèse que le réchauffement global qui répond à l'intensification anthropique de l'effet de serre se manifeste justement par une exacerbation de certains modes de variation naturelle. De plus en plus d'ailleurs, les climatologues relient l'oscillation de l'Atlantique Nord à un mode de variation naturelle impliquant aussi l'Arctique et l'ensemble des hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

III. – Évolution des techniques de mesure

1. La troisième dimension. – Les températures ne suffisent pas ; pour définir le climat en un lieu, il faut surveiller l'ensemble des variables météorologiques – température, pression, précipitation, vent, humidité, couverture nuageuse, insolation... Toutefois, si des mesures ainsi faites pendant au moins trente ans suffisent pour établir la climatologie d'une station météorologique, elles ne permettent pas de comprendre le climat de ce lieu, de modéliser ses mécanismes en vue d'évaluer sa sensibilité aux perturbations et son évolution probable en réponse aux forçages naturels ou anthropiques. Pour initialiser et pour évaluer les simulations, il faut mesurer les variables météorologiques dans la troisième dimension, en altitude, et partout sur la Terre. Il faut, en outre, mieux connaître les océans, non seulement la température et les courants à la surface, mais aussi la variation avec la profondeur du courant, de la température, et de la salinité.

L'exploration de la troisième dimension de l'atmosphère commença avec l'expédition organisée par Blaise Pascal au sommet du Puy de Dôme en 1648, mais elle ne devint systématique qu'au ^{xx}^e siècle. Dans son domaine de Trappes, Léon Teisserenc de Bort développa la technique des ballons-sondes montant à plus de 12 km d'altitude et récupérés après parachutage au sol ; les nacelles emportaient différents instruments et enregistraient les mesures. Teisserenc de Bort analysa ces mesures et annonça en 1902 sa découverte d'une couche dans laquelle la température ne décroissait plus avec l'altitude, qu'il nomma la *stratosphère* (fig. 8), donnant en même temps le nom de *troposphère* aux couches plus basses. Plus tard, installant des émetteurs radio dans les nacelles, on s'affranchit de la nécessité de les récupérer. Le premier *radiosondage* au monde a été fait en janvier 1929, justement à partir du domaine de Trappes, devenu site du Service des équipements et des techniques

instrumentales de la météorologie. Aujourd'hui, partout dans le monde, les stations météorologiques lâchent toutes les douze heures, aux heures *synoptiques*, c'est-à-dire réellement simultanément et non à la même heure locale, des ballons-radiosondes qui renvoient leurs données sur la variation verticale de l'état physique de l'atmosphère. On dispose ainsi, depuis quelques décennies, d'une climatologie tridimensionnelle assez complète au-dessus des continents et des îles ; depuis quelques décennies seulement, avec des vides ici et là en fonction du sous-développement, des guerres et autres troubles, et avec la tâche difficile d'harmoniser les mesures obtenues avec des instruments différents dans les différents pays du monde.

2. L'observation spatiale de l'atmosphère. – La couverture uniforme du globe devient possible à partir de 1960 avec les satellites météorologiques. En orbite circulaire basse (altitude 600-1 200 km, période orbitale proche de cent minutes), avec une inclinaison proche de 90° , donc passant près des pôles, un satellite peut observer toute la Terre deux fois par période de vingt-quatre heures, la trace de l'orbite et la fauchée d'observation des instruments étant décalées environ 2 800 km à l'ouest entre chaque passage à l'équateur. Avec une orbite *héliosynchrone* (par exemple, une orbite rétrograde à inclinaison 98° , à une altitude de 650 km), l'orientation du plan de l'orbite par rapport à la direction du Soleil reste fixe, le satellite passant à la même heure locale jour après jour. Ces orbites de choix pour différents types d'observation de la Terre ne permettent cependant pas le suivi de phénomènes à évolution rapide ; dès 1967, on commence à utiliser les orbites *géosynchrones* qui permettent de surveiller une partie du globe sans désespérer. En orbite circulaire, à 35 700 km au-dessus de l'équateur, ces satellites font le tour de la Terre avec la même période (24 heures en

temps sidéral, soit 23 h 56 min 04 s solaires) nécessaire à la planète pour tourner sur elle-même. Le domaine observable s'étend jusqu'à 75° de latitude et de longitude de part et d'autre du point fixe sous le satellite. Le satellite européen *Météosat* (dont le premier a été lancé en nov. 1977), reste au-dessus de l'intersection du méridien de Greenwich avec l'équateur.

Cinq satellites géosynchrones bien placés autour de la Terre peuvent fournir une couverture permanente et continue de tout le globe (à l'exception des très hautes latitudes bien observées par les satellites en orbites polaires). En 2002, cette couverture continue est assurée par deux satellites européens (un deuxième *Météosat* placé au-dessus de l'océan Indien comble les insuffisances des satellites que les Russes, les Indiens, et les Chinois ont essayé à différents moments de faire fonctionner sur ce secteur), deux satellites américains, et un satellite japonais. Depuis 1983, le Programme international de climatologie satellitaire de la nébulosité (ISCCP) poursuit l'analyse systématique des données fournies par cette constellation internationale (pas toujours au complet, surtout sur l'océan Indien) complétée par les satellites polaires. On dispose donc d'une climatologie presque complète de la couverture nuageuse du globe. Presque, parce que les instruments sur ces satellites n'observent bien que la couche supérieure des nuages, ne fournissant que peu d'informations sur les nuages bas cachés par des nuages plus élevés. De la même façon, les observateurs au sol ne peuvent voir les cirrus lorsqu'une couche de nuages bas (stratus, stratocumulus) remplit leur ciel.

Cela constitue une limitation fondamentale de l'outil spatial. L'observation spatiale est idéale pour déterminer la valeur exacte de la constante solaire et de ses variations, et Abbot en avait eu l'intuition dès 1908. A-t-on envisagé avant 1945 d'utiliser des

satellites pour l'observation météorologique ? L'idée s'est certainement imposée après l'examen des premières photos obtenues des fusées V2 prises aux Allemands et tirées par les Américains au Nouveau-Mexique. Toutefois, si les satellites permettent d'observer toute la Terre, les instruments qu'ils emportent ne font pas de mesures directes des conditions à la surface, pas plus d'ailleurs qu'ils ne mesurent celles au sein de l'atmosphère et des nuages. Et pourtant, en plus de la constante solaire, ce sont ces conditions-là qu'il faut observer. Comment déterminer la température moyenne à la surface de la Terre ? Le rayonnement infrarouge émis par la surface dépend certes de la température, mais il dépend aussi, selon la longueur d'onde, de l'émissivité de la surface. Cette émissivité, connue pour la surface de la mer, varie pour les glaces, la végétation, et les terres émergées en général. Entre 8 et 9 μm de longueur d'onde, les sables désertiques émettent bien moins de rayonnement que ce que donne la courbe de Planck (fig. 6), beaucoup moins que la majorité des surfaces. Une difficulté plus grande encore vient de ce que le rayonnement parvenant aux instruments en orbite dépend nécessairement de l'atmosphère qu'il traverse.

Même dans la fenêtre infrarouge vers 11 μm de longueur d'onde, la transparence de l'atmosphère claire n'est pas totale ; elle est réduite là où l'humidité est très forte comme dans les tropiques. De plus, les nuages, jamais transparents dans l'infrarouge, sont souvent tout à fait opaques, ce qui permet d'ailleurs d'obtenir des images de la couverture nuageuse la nuit. On peut néanmoins utiliser les mesures spatiales du rayonnement dans la fenêtre infrarouge pour estimer les températures de surface dans les régions sans nuages. Pour déterminer les températures à la surface de la mer, les services météorologiques opérationnels se servent des données satellitaires

sur les océans, mais ils vérifient et corrigent ces déterminations en utilisant des mesures clairsemées faites à partir de navires et de bouées. On dispose depuis les années 1970 d'une assez bonne climatologie des températures à la surface de toutes les mers, même loin des voies maritimes fréquentées. Toutefois, après chaque éruption volcanique majeure (El Chichón en 1982, Pinatubo en 1991), les voiles d'aérosols dans la stratosphère obligent à revoir les algorithmes de détermination des températures.

3. Des données pour les modèles. – Les modèles de circulation générale utilisés pour la prévision numérique du temps dépendent de l'analyse de la structure tridimensionnelle de l'atmosphère, de l'*assimilation* de mesures de plusieurs types, radiosondages et mesures de surface d'une part, mesures satellitaires d'autre part. Parmi ces dernières, la spectrométrie infrarouge joue un rôle important pour déterminer, par *inversion des sondages infrarouges*, la variation verticale de la température et de l'humidité. En effet, l'atmosphère claire est plus ou moins opaque selon la longueur d'onde et en fonction de l'humidité. Toutefois, les nuages perturbent ou bloquent ces déterminations. Les aires sans nuages, comme les trous dans les nuages, où l'on peut mener à bien l'inversion jusqu'à la surface, ne représentent qu'imparfaitement la surface et l'atmosphère dans et sous les nuages.

Au-delà de l'infrarouge, il existe bien des longueurs d'onde (les *micro-ondes*) où le rayonnement thermique émis par la surface et l'atmosphère n'est guère affecté par les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace des nuages. Selon la longueur d'onde, le rayonnement parvenant au radiomètre en orbite représente soit la surface, soit les couches de la troposphère, soit la stratosphère. L'incertitude sur l'émissivité rend imprécise la détermination des températures de surface ailleurs que sur les océans, mais on estime

pouvoir déterminer des températures atmosphériques bien représentatives de l'ensemble du globe à partir de ces données MSU (*Microwave Sounding Unit*, unité de sondage à micro-ondes à bord des satellites météorologiques polaires américains). D'où une vive polémique, car les premières analyses des mesures obtenues depuis 1979 *ne semblaient pas révéler* un réchauffement dans la troposphère, contrairement à ce qui est établi sans doute aucun pour les températures de surface, contrairement aussi à ce qui est prévu par les modèles du climat pour le renforcement de l'effet de serre¹.

La polémique a tourné autour de plusieurs points. En fait, si les mesures par le canal 2 du MSU dépendent surtout des températures dans la troposphère (couches atmosphériques de la surface à 12 km d'altitude : [fig. 8](#)), elles sont influencées aussi par les températures dans la stratosphère au-dessus. Or, le renforcement de l'effet de serre tend à refroidir la stratosphère en même temps qu'il réchauffe des couches plus basses, d'où une compensation partielle dans le rayonnement micro-ondes. Alors que la surface s'est réchauffée depuis 1975 ([fig. 9](#)), la basse stratosphère s'est *refroidie* d'environ 1 °C au cours de la même période. Lorsqu'on prend en compte l'effet de ce refroidissement sur le rayonnement aux longueurs d'onde auxquelles est sensible le canal 2 du MSU, on trouve que les températures des couches troposphériques ont augmenté d'environ 0,75 °C depuis 1975, un réchauffement en bon accord avec le renforcement anthropique de l'effet de serre. Autre source d'erreur, les mesures viennent de plusieurs instruments embarqués sur des satellites remplacés à plusieurs reprises, et les orbites de ces satellites polaires ne sont qu'approximativement héliosynchrones. En fait, l'heure locale de passage à l'équateur dérive avec les mois et les années, et cette dérive introduit un biais lié à l'existence du cycle diurne de la température au sol. De plus, avec seulement deux

mesures par période de vingt-quatre heures, il a fallu introduire une correction pour tenir compte plus précisément de ce cycle diurne, notamment pour la zone tropicale. En fin de compte, une analyse plus rigoureuse de chacun de ces points a montré que la troposphère s'est bien réchauffée, tout comme la surface, depuis 1978². Certes, il reste du travail pour les spécialistes : la modélisation des changements dans la troposphère avec ses *nuages* ne reproduit pas très bien ce qui est observé, et en particulier les différents modèles obtiennent des résultats contradictoires pour l'eau des nuages.

On voit la difficulté d'établir une climatologie satellitaire rigoureuse des températures et de la couverture nuageuse sur tout le globe. L'analyse systématique des données sur les nuages n'a commencé qu'en 1983, autant dire qu'il s'agit seulement d'une climatologie du *présent*. Pour l'eau liquide totale des nuages au-dessus des océans, les premières données n'arrivent que depuis 1988 grâce aux satellites météorologiques militaires américains. Pour d'autres types de mesures – les pluies sur les océans ou sur les régions sans station météorologique, le niveau exact de la mer loin des côtes ou des îles, la répartition verticale de l'eau liquide et de la glace dans les nuages, la répartition des aérosols en altitude –, il n'existe pas encore assez de données, ou pas de données du tout. Le satellite océanographique franco-américain *Topex-Poseidon* a été lancé en 1992, le satellite européen *Envisat* en 2001. Le couple de satellite *Calipso* et *Cloudsat*, sondant justement l'eau des nuages, n'a été lancé qu'en 2006. Le projet de coopération entre les agences spatiales européenne et japonaise pour un satellite *EarthCARE* (*Cloud-Aerosol-Radiation Explorer*) emportant une panoplie d'instruments (radar, radar laser, imageur multispectral, spectromètre infrarouge, radiomètre pour le bilan

radiatif) pour étudier en détail, dans la dimension verticale, ce qui se passe au sein des nuages, aboutira, peut-être, à un lancement avant 2020. Pour les spécialistes exigeants, la climatologie rigoureuse et complète n'existe pas encore ; elle est pour demain, sinon après-demain.

4. Surveiller les océans et les glaces. – Le même constat s'applique aux mesures dans les océans et les glaces. La mesure systématique des températures à la surface de la mer commence au XIX^e siècle, mais il faut attendre 1948 pour avoir assez de mesures en profondeur qui permettent d'évaluer le contenu calorifique des océans, pour voir jusqu'à quelle profondeur pénètre le réchauffement à la surface. En 2000, la couche mélangée, de la surface jusqu'à 300 m de profondeur, s'est réchauffée de 0,3 °C en moyenne, et de presque 0,4 °C dans l'Atlantique Nord ; et le réchauffement a pénétré en partie jusqu'à 3 000 m de profondeur. Entre 1993 et 2003, l'augmentation du contenu en chaleur de l'océan correspond à un déséquilibre de 0,85 Wm⁻². Mais la tendance au réchauffement en profondeur n'est pas uniforme : en particulier, après avoir augmenté entre 1948 et 1969, les températures de l'Atlantique Nord à 1 750 m de profondeur ont *diminué* entre 1970 et 1992. Ces changements dépendent de la phase de l'oscillation de l'Atlantique Nord et de la vigueur de la convection thermohaline dans les mers de Labrador et de Norvège qui envoie de l'eau très salée et froide de la surface aux grandes profondeurs. Dans les autres océans, où la convection profonde joue un rôle moins important, le réchauffement est assez général depuis 1950, quoique avec des irrégularités, dont certaines trahissent peut-être les effets des alternances entre El Niño et La Niña une ou deux fois par décennie. Le développement des

télécommunications relayées par satellite et les progrès de la technologie ont permis de mettre en place dans les années 1980 un réseau de bouées dérivantes dans l'océan Pacifique équatorial, pour surveiller la température, non seulement en surface mais également en profondeur avec des sondes plongeantes. Grâce à ce réseau, les prévisions d'événements El Niño s'améliorent. On met en place un réseau similaire dans l'Atlantique.

Avec la fin de la guerre froide, les chercheurs commencent à avoir accès aux mesures faites par les marines américaines et soviétiques, notamment dans l'Arctique. Des progrès techniques augmentent les possibilités de mesure dans ces couches de glaces flottantes. On constate que depuis 1950, l'épaisseur moyenne de la glace arctique (en été) a diminué de 40 %, et son étendue (au printemps et en été) de 10 à 15 %. Depuis 1979, les mesures satellitaires du rayonnement micro-ondes permettent de suivre l'étendue de ces glaces, qui dans l'océan Arctique a diminué de plus de 6 % en moyenne entre 1979 et 2005, et de plus de 18 % pour la couverture minimum. À la fin de l'été 2007, le rétrécissement des glaces arctiques a dégagé le passage de nord-ouest recherché par des marins depuis des siècles. Quant à l'Antarctique, des images satellitaires montrent la désagrégation dramatique de la banquise en marge du continent. Cependant, pour déterminer si le volume total des glaces sur le continent est en train de changer, il faut les mesures radar, fournies par certains satellites depuis seulement une dizaine d'années. Ce type de mesures, couplées à des mesures sur le terrain, révèle des écoulements dramatiques au Groenland et commence à permettre le suivi de ces volumes de glaces du Groenland et de l'Antarctique. La climatologie observationnelle moderne se décline ainsi surtout au *futur*.

IV. – La recherche des climats passés

1. Pourquoi étudier le passé ? – Les progrès de l'observation spatiale et de l'océanographie portent avec eux la promesse d'une connaissance plus complète et détaillée de tous les ressorts et rouages du climat, dans les profondeurs de la mer comme au sein des nuages. Mais nous vivons en ce début du xxi^{e} siècle une transition imposée par l'humanité, qui commence à remplir l'atmosphère de la planète avec les produits de ses activités industrielles et agricoles. Le climat, que nous avons appris à connaître plus ou moins bien, et qui, malgré des fluctuations parfois difficiles à vivre, n'a pas beaucoup changé depuis quelques millénaires, évolue maintenant vers un état nouveau dont nous essayons de voir les contours. Sommes-nous condamnés à attendre l'issue de l'expérience grandeur planète en cours ? Nos modèles, accordés pour coller au climat présent et pour produire des prévisions à peu près fiables à courte échéance, conviennent-ils encore pour ces climats nouveaux qui s'installeront au fur et à mesure que nous altérerons l'atmosphère ? Les projections dépendent du modèle adopté, mais lequel choisir ? Pour faire le tri parmi ces modèles, une méthode consiste à chercher celui qui, tout en collant au climat présent, rend bien compte des climats très différents du passé.

2. Les outils de la paléoclimatologie. – Avec le développement, depuis les années 1940, des analyses de rapports isotopiques de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, et d'autres éléments dans les glaces continentales et les sédiments marins et lacustres, nous avons avancé à grands pas dans la connaissance des climats passés. Les coquilles calcaires de foraminifères (animaux microscopiques vivant d'algues) s'accumulent dans les

sédiments marins, où les rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ montrent comment la température de l'eau de mer a varié depuis des centaines de millénaires, avec des rythmes qui confirment l'hypothèse de Milankovitch sur l'origine astronomique des alternances glaciaires-interglaciaires. Les carottes de glace extraites par forages dans les couches de quelques kilomètres d'épaisseur empilées sur le Groenland et l'Antarctique fournissent la chronologie détaillée, sur 420 000 ans, non seulement des variations de la température et du volume total de glaces sur la Terre, mais aussi – sauf pour la vapeur d'eau ! – des changements dans la composition de l'air (fig. 4). Les carottages plus récents du projet EPICA permettent de remonter 740 000 ans dans le passé. Particulièrement remarquable a été le développement, notamment à Grenoble, de l'analyse – sans contamination au laboratoire ! – de bulles d'air piégées depuis des millénaires dans ces glaces. Ces courbes montrent les variations des teneurs atmosphériques du CO_2 et du CH_4 , modulant l'effet de serre, amplifiant les refroidissements et réchauffements dans les cycles glaciaires d'origine astronomique. Les modèles peuvent prendre en compte ces variations *naturelles* de l'effet de serre, variations presque certainement amplifiées par une rétroaction positive de l'humidité. On sait que les déserts furent bien plus étendus et les conditions généralement plus sèches pendant le dernier maximum glaciaire.

Ces grands cycles climatiques impliquent aussi, sans aucun doute, des changements de grande ampleur dans les transports de chaleur de l'équateur vers les pôles par la circulation océanique. Or, les chercheurs ne sont qu'au début du développement de modèles climatiques incorporant les couplages entre les processus atmosphériques rapides et les processus océaniques (généralement plus lents, pour certains *beaucoup* plus lents). Le projet international

CLIMAP (*Climate : Long-range Investigation, Mapping and Prediction*) des années 1970 avait établi la carte du dernier maximum glaciaire, reconstitution donnant des températures marines à peine moins chaudes qu'aujourd'hui aux basses latitudes. Et pourtant, le refroidissement a aussi affecté les tropiques. Une équipe américaine dirigée par Lonnie Thompson à Ohio State University a réussi l'exploit d'extraire des carottes de glace d'un glacier près de l'équateur, à 6 000 m d'altitude dans les Andes, contenant 20 000 ans d'accumulation de neige. Ces informations sur les variations en altitude comparées à celles au niveau de la mer vont aider à améliorer les modèles couplés, puisqu'ils donnent des contraintes supplémentaires sur les rôles de l'océan et de l'atmosphère dans les grands changements climatiques.

3. Variations rapides du climat. – Des analyses de plus en plus fines de carottes de glaces, de sédiments lacustres, de tourbières, montrent que les grands cycles climatiques plurimillénaires sont ponctués de variations beaucoup plus rapides. Plusieurs fois au cours du Pléistocène, le climat est passé soudainement – en une décennie ou deux ! – du froid au *très* froid. Un tel refroidissement de choc est intervenu il y a environ 13 000 ans, au cours du réchauffement global (lui-même plutôt rapide) terminant la dernière période glaciaire. Cet épisode, connu sous le nom de *Dryas récent*, a interrompu en bien moins d'un siècle le recul des glaces et le réchauffement, sévissant pendant près de mille ans avant de se terminer encore plus brusquement, il y a 11 600 ans. L'analyse de la carotte *GISP2* du centre du Groenland montre que la température est montée de 15 °C et que les chutes de neige ont doublé, en moins de dix ans ! Cet épisode n'était point limité au Groenland, son existence se reflétant dans les changements de la végétation en Europe suivis par l'analyse des pollens piégés dans les tourbières.

Un autre coup de froid, beaucoup plus court, a frappé il y a 8 200 ans, avec des conséquences s'étendant au moins jusqu'au Proche Orient. Peut-être sommes-nous trop confiants dans la stabilité de notre climat interglaciaire !

Peut-on expliquer ces sauts climatiques par des blocages soudains de la circulation profonde de l'océan, en « tapis convoyeur » de chaleur ? Plusieurs chercheurs, en particulier Stefan Rahmstorf à Potsdam (Allemagne), ont montré que le régime actuel de cette circulation, en vigueur depuis au moins 8 000 ans et très important pour le maintien de la clémence relative du climat en Europe du Nord, n'est pas le seul possible. D'autres régimes existent, bien moins favorables aux pays nordiques. Le régime actuel serait-il à la limite de sa stabilité, de telle sorte qu'il suffirait de peu de chose – un peu plus d'eau douce en un endroit critique – pour le faire basculer vers un régime apportant moins de chaleur vers le nord ? Et les éruptions volcaniques ? Les fortes émissions de SO_2 par les volcans laissent des dépôts acides dans les glaces. Certains épisodes très courts, par exemple l'année « sans été » (1816), correspondent bien à des éruptions puissantes, mais pour maintenir le froid pendant des siècles, il faudrait une fièvre prolongée d'activité volcanique, ce qui ne semble pas avoir été le cas il y a 13 000 ans. Et quelques résultats très récents suggèrent que des éruptions volcaniques sous les glaces constituent une source non négligeable d'émissions naturelles de CO_2 qui finissent dans l'atmosphère. Il reste bien des mystères à résoudre, et sans doute bien d'autres que nous allons découvrir en affinant nos connaissances des variations climatiques du passé.

V. – Les risques climatiques du ^{xxi}^e siècle

1. **Vers une catastrophe climatique ?** – Par nos activités industrielles, agricoles et pastorales, nous changeons l'air et les surfaces du globe. Les changements de composition agissent sur les transports de chaleur au sein de l'atmosphère, et donc sur le climat. Nous pensons déceler cette influence dans les changements climatiques depuis 1900, surtout dans le réchauffement rapide depuis 1970. L'augmentation de la température moyenne de 1 °C depuis la fin du ^{xix}^e siècle a déjà provoqué un certain nombre de changements écologiques distincts de ceux directement causés par l'emprise humaine croissante sur la biosphère, distincts aussi des évolutions plus lentes engagées depuis la fin de la dernière période glaciaire. Et pourtant, ce changement récent, remarquablement rapide, reste encore bien modeste comparé à ce que nous risquons de voir au cours de ce ^{xxi}^e siècle. Cela dépendra, bien sûr, de la poursuite ou non de notre altération de la composition de l'atmosphère, et nous savons bien que de nombreuses incertitudes politiques, économiques et technologiques pèsent sur cette question.

Comme il paraît difficile, sauf catastrophe économique mondiale, de réduire rapidement nos émissions de GES, et comme, pour la plupart, ces émissions s'accumulent dans l'atmosphère, l'intensification de l'effet de serre va vraisemblablement croître pendant au moins quelques décennies encore. Certains calculs laissent prévoir pour 2030, autant dire demain, un changement climatique aussi important que celui engagé depuis 1900. Et pour 2100, certaines combinaisons de scénarios d'émissions et de modèles climatiques laissent prévoir un réchauffement global de plus de 4 °C ([fig. 1](#)). Dans l'Accord de Paris de 2015, on a pris 2 °C

comme une limite à ne pas dépasser dans le réchauffement « global ». Aujourd'hui, de nombreux spécialistes estiment que des changements dramatiques et dangereux de certains climats régionaux se déclareraient à partir de « seulement » 1,5 °C (rapport spécial du GIEC d'octobre 2018). La vie pourrait sans doute s'adapter à un climat plus chaud, à une Terre sans glaces comme celle d'il y a quelques dizaines de millions d'années, mais l'adaptation exige du temps. Dans *l'ensemble*, la vie n'a pas souffert de la situation hors équilibre de réchauffement rapide, de 5 °C en quelques millénaires, qui a mis fin à la précédente période glaciaire. Beaucoup d'espèces en ont profité, d'autres en ont souffert. En Europe, certaines n'ont trouvé refuge que dans les hauteurs des Alpes, mais pour combien de temps encore ? Un réchauffement de 5 °C *en un seul siècle* constitue une véritable catastrophe climatique, avec un très fort déséquilibre dans les processus géochimiques et écologiques. Il n'est pas du tout sûr que le système s'adaptera en évoluant vers un nouvel équilibre similaire quoique décalé de l'équilibre approximatif (et jamais parfaitement réalisé !) du dernier millénaire. Il faut alors s'attendre à des surprises, mauvaises pour certains.

2. La rétroaction critique du cycle de l'eau. – La sensibilité du climat à l'intensification de l'effet de serre dépend en premier lieu des rétroactions liées d'une part à la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, d'autre part aux modifications de la nébulosité. Quelques spécialistes, en particulier Richard Lindzen du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), ont estimé que le cycle de l'eau et des nuages réagit globalement aux forçages en boucle de rétroaction négative, c'est-à-dire de façon à limiter l'ampleur du réchauffement en réponse à l'enrichissement anthropique de l'atmosphère en GES. La plupart des spécialistes ont trouvé, au

contraire, que l'analyse des observations confirme l'opération des rétroactions *positives* incorporées dans les modèles. La nature a conduit une sorte d'expérience *in vivo* avec l'éruption du mont Pinatubo en 1991. Ses rejets de SO₂ ont rapidement conduit à la formation d'une couche étendue d'aérosols sulfatés dans la stratosphère, renforçant l'effet parasol pendant deux ans. La réponse à ce forçage négatif (moins d'énergie solaire absorbée à la surface et dans la troposphère) a été un refroidissement en 1992 et 1993, interrompant la tendance au réchauffement. On a en même temps observé une diminution de l'humidité atmosphérique, affaiblissant la contribution de la vapeur d'eau à l'effet de serre. Cette rétroaction positive, amplifiant la réponse au forçage négatif, explique la diminution de 0,15 °C de la température moyenne à la surface du globe entre 1991 et 1992.

De même, pour la réponse au forçage positif de l'intensification de l'effet de serre, la rétroaction positive de l'eau joue un rôle critique. Avec un scénario d'émissions croissantes de CO₂ accompagnées d'une réduction de la pollution soufrée, donnant un forçage de + 9 Wm⁻² en 2100, cette rétroaction positive induit un réchauffement supérieur à 3 °C. Un réchauffement global fort implique *nécessairement* une modification significative du cycle de l'eau (fig. 7). Cette modification comporte presque certainement une augmentation de la quantité de vapeur d'eau atmosphérique et donc un renforcement de sa contribution à l'effet de serre. Effectivement, l'observation de l'humidité atmosphérique à partir des satellites météorologiques depuis 1978 confirme cette tendance d'augmentation de l'humidité accompagnant le réchauffement.

Un changement de la *quantité* de vapeur d'eau dans l'atmosphère affecte certainement les *flux* d'évaporation qui alimentent celle-ci, ainsi que les taux de condensation et de

précipitation qui retournent cette eau à la surface environ 40 fois par an. Les nuages ne renferment qu'une très faible partie de l'eau présente dans l'atmosphère, mais la quasi-totalité de la phase de condensation (et de gel) atmosphérique s'y déroule, et l'on conçoit que l'étendue, la durée de vie, et les propriétés physiques des nuages changent avec tout changement dans l'humidité. Au cours du xx^e siècle, la couverture nuageuse semble avoir augmenté de 2 % au-dessus des continents, peut-être aussi au-dessus des océans. Cependant, on ne sait pas aujourd'hui calculer avec confiance quels seront les changements à venir, et si les changements dans les contributions de différents types de nuages à l'effet parasol et à l'effet de serre agiront globalement comme rétroaction positive ou négative.

3. Les projections de changement climatique. – Pour beaucoup des simulations, on constate une certaine cohérence dans la répartition des changements de la température de surface. Les scénarios à fortes émissions de SO_2 donnent des réchauffements moins importants là où le renforcement de l'effet parasol compense en partie l'intensification de l'effet de serre. De manière générale, cependant, les continents se réchauffent plus que les océans, les latitudes polaires plus que les tropiques ([fig. 10](#)). Plus précisément, avec un scénario d'émissions modérées A1B ([fig. 1](#)), le réchauffement moyen donné par les modèles dépasse 3 °C pour pratiquement toutes les terres continentales. Le réchauffement projeté dépasse 5 °C en Sibérie, en Alaska ainsi que sur plus de la moitié du Canada, et 8 °C sur l'océan Arctique. Il dépasse 2 °C sur une grande partie des océans, ce qui ne peut manquer d'entraîner une montée du niveau de la mer par suite de la dilatation thermique des eaux dans la couche mélangée superficielle. Cela correspond à

une diminution importante des glaces de mer et des surfaces couvertes de neige sur les terres.

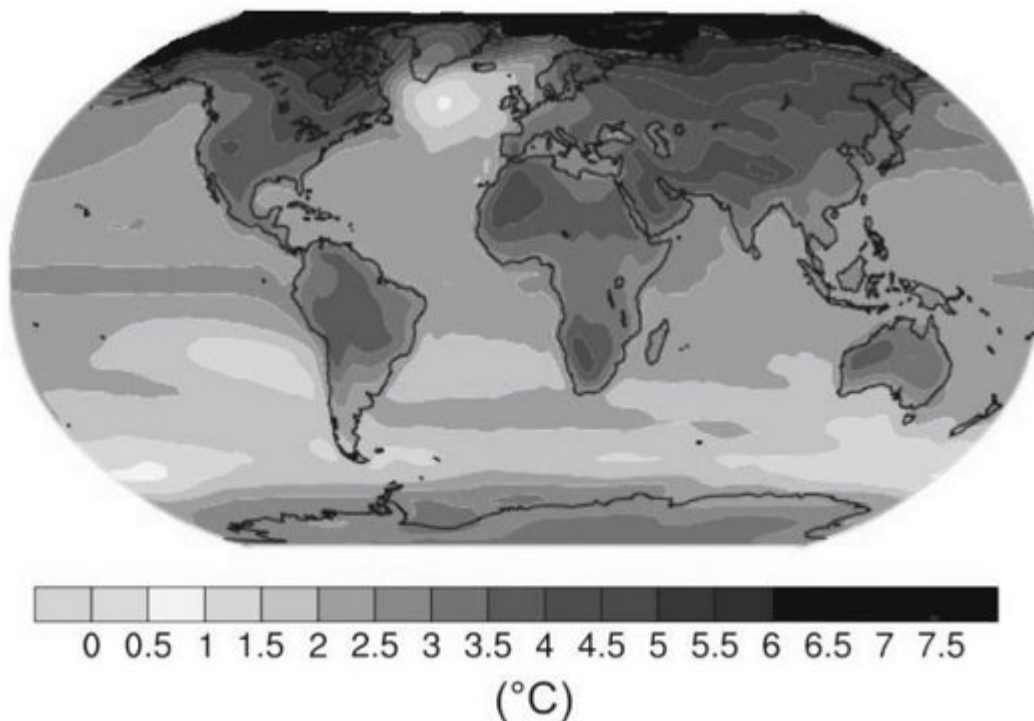


Fig. 10. – Répartition géographique moyenne donnée par un ensemble de modèles pour le réchauffement pour la période 2080-2099 comparée à la période 1980-1999, elle-même plus chaude que 1961-1990. D'après le 4^e rapport du GIEC (WG1). À noter que de nombreuses cartes de répartition géographique et saisonnière du réchauffement sont disponibles pour différents scénarios d'émissions de GES ainsi que pour différents modèles climatiques sur de nombreux sites Internet.

De nombreuses incertitudes portent sur les interactions entre l'océan, les glaces et l'atmosphère, et sur le fonctionnement de la convection thermohaline qui agit comme moteur du système de courants en tapis convoyeur de chaleur.

Pour beaucoup des modèles, les simulations donnent aussi une intensification du cycle hydrologique global, c'est-à-dire une augmentation, en moyenne sur l'année et sur le globe, des flux d'évaporation et de précipitation. Pour certains de ces modèles, les précipitations sur l'ensemble des terres émergées augmentent, pour d'autres elles diminuent. La plupart des modèles donnent des précipitations en augmentation aux latitudes élevées, de plus de 20 % sur certaines régions en hiver et au printemps. Des augmentations importantes apparaissent également sur certaines zones océaniques autour de l'équateur. Les projections s'accordent aussi pour donner des précipitations en diminution significative sur d'autres régions, notamment dans les zones subtropicales et autour de la Méditerranée. Toutefois, pour beaucoup de régions du monde, les résultats des différents modèles paraissent souvent incohérents, voire en contradiction flagrante. Il en est de même pour les modifications projetées dans le ruissellement, même en se limitant à l'horizon 2050. Ainsi, lorsqu'on compare les projections de différents modèles pour un scénario d'émissions modérées, on trouve des différences importantes sur plusieurs régions, notamment le sous-continent indien, une grande partie de la Chine et l'est des États-Unis. Pour un modèle, la ressource en eau douce augmente, pour l'autre elle diminue.

Ces incohérences découlent en grande partie d'incertitudes sur la manière de paramétrer le fonctionnement du cycle de l'eau à des échelles inférieures à celle de la maille des modèles : processus de condensation de l'eau dans les nuages, formation des précipitations, et devenir de l'eau une fois à la surface. Les effets des aérosols sulfatés sur la taille des gouttelettes d'eau dans les nuages et, par là, sur la réflectivité de ces nuages restent particulièrement difficiles à évaluer. En outre, des chercheurs israéliens ont suggéré que ces

effets se traduisent aussi par une diminution sensible des précipitations dans les régions polluées. Le cycle de l'eau reste un cycle, et l'eau doit finir par retomber quelque part, mais toute modification dans la répartition géographique et dans l'intensité des pluies a nécessairement un impact important, à la fois pour la sécurité et pour l'économie. Quoi qu'il en soit, le réchauffement va dessiner une nouvelle carte des ressources en eau, avec des conséquences sensibles pour l'agriculture et pour l'approvisionnement en eau des villes, comme pour la biosphère naturelle.

4. Changement climatique et variabilité. – La partie *atmosphérique* du cycle de l'eau – transport de vapeur d'eau, condensation et formation des nuages, précipitations – répond rapidement aux forçages, puisqu'une molécule d'eau ne réside en moyenne que neuf jours dans l'atmosphère. Certes, quelques éléments océaniques ou continentaux retardent la réponse de l'ensemble du cycle de l'eau aux forçages climatiques. Néanmoins, les conditions physiques de la vie sur les terres vont changer rapidement, en réponse aux variations de la température et du bilan hydrique, même si ces changements rapides ne constituent qu'une étape dans une évolution plus lente. Or, avec la croissance des forçages anthropiques, les changements climatiques attendus pour les trente, cinquante, ou cent ans à venir correspondent à des déplacements des zones convenant à différents types de végétation et aux espèces animales qui en dépendent. Dans certains cas les changements seront favorables : augmentation de la saison de croissance, diminution des jours de gel, fertilisation par le CO₂ et meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau par les plantes, amélioration du bilan hydrique dans certaines régions. Même en

présence d'une péjoration du bilan hydrique, les agriculteurs bien informés sauront adapter leurs cultures. Dans d'autres régions, tout ira mal : les espèces cultivées ne profiteront pas de l'augmentation du CO₂, le bilan hydrique deviendra trop mauvais, et les frontières politiques compliqueront les migrations. Voilà donc quelques-uns des problèmes les plus aigus auxquels l'humanité risque d'être confrontée.

Les changements climatiques seront-ils significatifs par comparaison à la variabilité intrinsèque au climat ? La réponse dépend certainement de la région. Selon certains modèles, les changements moyennés de la période 2041-2070 conduiront, d'une part, à une augmentation du ruissellement en Scandinavie et en Écosse, d'autre part à un assèchement, plus ou moins fort selon les modèles, dans tout le reste de l'Europe, du Portugal et de la France jusqu'aux Balkans, la Pologne, et l'Ukraine. On sait cependant que les pluies et le ruissellement varient énormément d'une année à l'autre ; pensez à la sécheresse de l'été 1976, aux pluies diluviennes de l'hiver 2000-2001 en France ! De ce fait, les changements climatiques prévus pour 2041-2070 ne dépassent sensiblement la variabilité naturelle que sur une *partie* de l'Europe. De l'Angleterre et de la France jusqu'en Russie, on distinguera difficilement la tendance à l'assèchement d'une sécheresse passagère. En revanche, dans la moitié est de l'Espagne et le sud de l'Italie, et de l'arc alpin jusqu'en Grèce et le sud de la Turquie en passant par l'ex-Yougoslavie, et plus généralement tout autour de la Méditerranée, l'assèchement dépassera sensiblement la variabilité naturelle ; il en sera de même pour l'augmentation du ruissellement en Scandinavie.

Cette question se complique par la possibilité, voire la quasi-certitude, que la variabilité, elle-même un aspect du climat, change à son tour avec le réchauffement. On sait que les conditions

climatiques ont généralement leurs impacts – sur l’Homme, ses cultures et ses créations, comme sur les forêts – les plus spectaculaires, parfois sinon toujours les plus forts, par l’action d’événements météorologiques extrêmes. D’un côté les sécheresses prolongées, de l’autre les pluies très intenses provoquant des inondations ; journées de chaleur record, périodes de gel ; tempêtes violentes, cyclones, blizzards, tornades. Sommes-nous condamnés à voir croître le nombre et l’intensité de ces événements ? Aujourd’hui, grâce aux relais médiatiques, le public prend connaissance de toute catastrophe météorologique, où qu’elle survienne. En même temps, peut-être à cause du flot continu d’informations, la mémoire est courte ; on oublie les désastres d’autrefois. Les inondations de l’Aude se répètent, et semblent toujours prendre les gens au dépourvu. Les deux tempêtes des 26 et 27 décembre 1999 étaient certes les plus fortes, de mémoire d’homme, à avoir frappé la France loin à l’intérieur des terres. Mais quelle mémoire ? On mesure les vents seulement depuis les années 1920. Tempête du siècle loin des côtes, presque certainement ; tempête du millénaire, pire que celle qui a frappé l’Angleterre en novembre 1703, comment en être sûr ? Les enregistrements n’existent pas, si l’on ne veut considérer que les mesures modernes de grandeurs physiques. Pourtant, le passage de cataclysmes, tempêtes, inondations, sécheresses... est presque toujours consigné dans des chroniques de toutes sortes. Aucun document écrit ne nous renseigne sur la fréquence des ouragans dans les Antilles avant le voyage de Christophe Colomb en 1492, mais les archives plus anciennes de certaines provinces de Chine racontent les passages de typhons dévastateurs. Mais, problème : comment comparer les témoignages des siècles passés avec les mesures faites par les météorologues depuis moins de cent

cinquante ans ? Voilà un nouveau domaine de recherche sur l'ancien.

En 2018, on peut déjà analyser – au moins pour quelques régions du globe – les observations faites depuis 1900, et, pour certaines, cela montre des changements très nets. Ainsi le risque de chaleur extrême l'été en Grande-Bretagne aurait été multiplié par trente. Pour la Chine, avec ses côtes très peuplées, des spécialistes s'inquiètent des risques croissants d'inondations avec l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes. Pour l'avenir, il est sûr que la carte des risques va changer. Sans voir la catastrophe partout, il faut tenir compte de ces changements possibles ou probables, aussi bien pour choisir les emplacements et définir les contraintes d'équipements et de structures à longue durée de vie que pour traiter les questions de protection des populations et les assurances. Selon les troisième et quatrième rapports du GIEC et les documents préparatoires du cinquième rapport, on peut résumer les risques, et la confiance que l'on a dans ces évaluations, comme suit :

(A) *Réchauffement*. – Il est *pratiquement certain* qu'il fera plus chaud sur *presque toutes* les terres émergées, avec en particulier des températures maximales plus élevées, des températures minimales *nettement* plus élevées, davantage de jours de grande chaleur, et moins de jours très froids, avec notamment moins de jours (nuits) de gel.

Le réchauffement rallongera la saison de croissance (fait déjà constaté en Europe). La diminution des froids extrêmes réduira un important facteur de mortalité. Le gel joue cependant un rôle essentiel dans plusieurs écosystèmes, limitant la prolifération de certaines espèces jugées nuisibles. On évoque souvent les risques d'une extension des maladies « tropicales » : malaria, choléra,

dengue... Cependant, si les conditions climatiques déterminent en partie la survie des microbes ou des moustiques qui en sont les vecteurs, les migrations et les transports aériens jouent le principal rôle dans leur dispersion. La vulnérabilité des populations dépend des conditions d'hygiène et d'alimentation, donc des ressources hydrologiques et des facteurs socio-économiques. Les effets indirects des changements climatiques pèseront plus lourdement sur la santé que les effets directs du réchauffement.

Quelles leçons faut-il tirer de la « canicule » de l'été 2003 ? Il a fait extrêmement chaud et sec (surtout pendant la première quinzaine d'août) en Europe occidentale et centrale, alors qu'à New York il faisait plutôt frais, avec beaucoup de pluie. Même en tenant compte de la tendance au réchauffement planétaire ainsi que d'une augmentation de la variabilité en Europe, l'écart aux normes saisonnières correspond à un événement tout à fait exceptionnel, sans précédent depuis des siècles sinon des millénaires. Or, selon certaines simulations du réchauffement climatique, un tel épisode deviendra *beaucoup* moins exceptionnel (un été sur trois ?) d'ici la fin du ^exxi^e siècle. Quelles en seraient les conséquences ? Il faut espérer que les services de santé sauront tirer les leçons de la surmortalité de l'été 2003 (21 000 en France et ailleurs) pour améliorer la prise en charge des personnes les plus vulnérables. Remarquons qu'en Inde et au Pakistan, la surmortalité au cours de la vague de chaleur de mai et juin (moins exceptionnelle, mais avec des températures dépassant 50 °C) a été bien moins forte (1 500). En revanche, la surmortalité associée à une vague de froid en janvier y a dépassé 1 900. Les différences sont-elles à attribuer aux habitudes, à la structure d'âge de la population, au mode de vie ? En Europe, certaines adaptations (la généralisation de la climatisation,

comme aux États-Unis) auront des répercussions sur la demande de puissance électrique.

(B) *Ressources hydrologiques.* – Il est *probable* que, *pour la plupart*, les terres à l'intérieur des continents aux latitudes moyennes s'assècheront davantage en été, et que le risque de sécheresse prolongé augmentera, ainsi que celui des incendies plus violents dans certaines régions. Le retrait des glaciers de montagne va *presque certainement* continuer, affectant l'hydrologie des régions en aval. Les précipitations resteront moins longtemps sous forme de neige et l'eau coulera donc vers l'aval plus tôt au printemps, modifiant la gestion des usines hydroélectriques et les risques de crues désastreuses.

(C) *Précipitations.* – Il est *très probable* que le nombre d'événements de précipitations intenses augmentera sur *la plupart* des régions. Cela affectera les risques d'inondations et les taux d'érosion.

(D) *Cyclones tropicaux (ouragans, typhons).* – Il est *probable* que les vents maximaux soient plus forts et les pics de précipitation plus intenses sur *certaines* régions.

(E) *Tempêtes d'hiver.* – De même, il est *probable* que les vents maximaux seront plus forts et les pics de précipitation plus intenses sur *certaines* régions.

Il faut rester attentif aux détails du langage employé. Ainsi, affirmer que tel type d'événement sera plus fréquent sur *certaines* régions implique qu'il pourrait être moins fréquent sur d'autres.

5. Le niveau de la mer. – Le niveau de la mer est monté de 130 m depuis le dernier maximum glaciaire. Il reste encore d'importantes masses de glace au Groenland et en Antarctique. Si ces glaces devaient fondre, le niveau de la mer monterait de 70 m, de quoi modifier radicalement la carte en inondant des plaines côtières aujourd'hui très peuplées. Toutefois, le risque pour le ^{xxi}^e siècle vient d'abord de la dilatation des eaux superficielles à cause du réchauffement. La fonte des glaciers de montagne y contribuera peu. La disparition totale des glaces flottantes de l'océan Arctique n'aura aucun effet, car suivant le principe d'Archimède, ces glaces déplacent une masse équivalente d'eau liquide. Un réchauffement important au Groenland conduira à une diminution, voire à une disparition totale, de ses glaces. On a cru que cela prendrait au moins plusieurs siècles, avec peu d'effets discernables avant 2100, mais les observations récentes soulèvent des inquiétudes. Le volume d'eau concerné pourrait au maximum faire monter le niveau de la mer de 7 m. Et l'Antarctique ? Malgré la débâcle impressionnante observée dans la banquise Larsen entre janvier et avril 2002, on n'en attend pas une contribution importante à la montée de la mer au cours du ^{xxi}^e siècle. La banquise est constituée uniquement de glaces flottantes à la marge du continent. Même un très fort réchauffement ne portera pas les températures à l'intérieur du continent au-dessus de 0 °C. Un risque, déjà évoqué avant 1980, est de voir la calotte de l'Antarctique occidentale glisser dans la mer si la banquise dans laquelle elle se termine se désagrège. Les calculs récents, et les premières déterminations (par radar sur satellite) des écoulements de glace, laissent penser qu'une telle désintégration de la calotte ne commencera pas avant deux siècles. Au bout de quelques millénaires, cela pourrait faire monter le niveau de la mer de plusieurs mètres. Les processus vont se

dérouter encore plus lentement pour les glaces de l'Antarctique orientale, et l'on ne sait pas aujourd'hui dans quel sens ils vont opérer. Si les chutes de neige apportent plus d'eau (solide) à la calotte que ce qui se perd par une fonte plus rapide au bord, cela contribuera à faire *baïsser* le niveau de la mer.

Pour le siècle à venir donc, les projections dépendent essentiellement du réchauffement et de la dilatation thermique qui en résulte. Ces projections évaluent la montée du niveau de la mer entre 10 et 90 cm selon les scénarios d'émissions et la sensibilité des modèles, montée pouvant dépasser celle observée au xx^e siècle (15 cm). Même si elle ne change guère le dessin des côtes, elle posera un certain nombre de problèmes :

Les risques d'inondations dues aux surcotes lors des tempêtes augmenteront énormément dans de nombreuses régions très peuplées, souvent mal protégées, comme dans le delta du Gange au Bangladesh, à la Nouvelle-Orléans, ou dans certaines îles. Les pleines mers d'équinoxe deviendront encore plus difficiles à gérer. Beaucoup de régions du monde auront à se doter d'infrastructures à la hollandaise, mais peu de ces pays sont aussi riches que les Pays-Bas.

Les infiltrations d'eaux salées dans des nappes phréatiques côtières vont augmenter, ce qui compliquera encore plus le problème d'approvisionnement en eau potable dans maintes régions très peuplées. De même, *l'invasion par les eaux salées de terres humides* proches des côtes détruira certains écosystèmes qui rendent des services extrêmement précieux quoique rarement reconnus.

La fonte des glaces et la montée du niveau de la mer ne constituent pas la menace principale pour ce siècle, même avec l'intensification accélérée de l'effet de serre. Toutefois, la poursuite

d'un tel scénario engagerait l'humanité, et avec elle la planète tout entière, vers un réchauffement qui ne pourrait manquer de modifier le bilan des glaces sur les continents au cours des siècles suivants. En outre, ces changements pourraient se révéler *irréversibles*, continuant encore plusieurs siècles *après* une éventuelle stabilisation de la composition de l'atmosphère. Nous changeons la carte du monde.

6. Quelle crédibilité attacher à ces projections ? – En plus des surfaces habitées, nous, humains, modifions de plus en plus la composition de l'atmosphère tout entière. Nous modifions par cela le fonctionnement du « système climatique », qui comporte non seulement l'atmosphère, mais aussi les océans, les glaces, et en fait toute la biosphère, surtout la végétation des terres émergées. Dans les modèles climatiques les plus avancés, on essaie de représenter de manière réaliste tous les processus physiques, chimiques, et même biologiques qui entrent en jeu. Toutefois, cela se fait nécessairement de manière schématique. Ces modèles donnent des projections du changement climatique qui nous promettent déjà bien des difficultés et des désastres si nous poursuivons l'altération de l'atmosphère. Certes, la modélisation comporte des incertitudes intrinsèques à la représentation schématique de la complexité du monde. Il y a vingt ans, les incertitudes allaient entre peu et beaucoup de réchauffement d'ici la fin du ^exxi^e siècle, avec une montée du niveau de la mer limitée à quelques dizaines de centimètres. Aujourd'hui, les observations confirment que certaines rétroactions sont positives, donc facteurs d'amplification, et elles révèlent des changements qui vont bien plus vite. Aujourd'hui, les incertitudes vont plutôt entre le difficile et le catastrophique si nous ne réagissons pas rapidement. Certes, la modélisation ne tient pas

bien compte des phénomènes que les spécialistes appellent « nonlinéaires », c'est-à-dire des phénomènes où au-delà d'un certain seuil, il y a – sauf à croire à un Père Noël qui calme le jeu – accélération du changement voire rupture et passage rapide vers un état radicalement différent (effet de seuil). Et si le réchauffement progressif de 5 °C, en moins d'un siècle, constitue déjà une catastrophe pour une grande partie de la biosphère (y compris les humains), comment qualifier une mutation de la carte climatique en une seule décennie ?

CONCLUSION

Le climat et la politique

I. – Historique de la politique du climat

1. **De Stockholm à Genève.** – La première « journée de la Terre » a été célébrée sur les campus américains le 22 avril 1970. La guerre du Vietnam n'avait pas encore pris fin, la conscription, oui. À l'époque, les préoccupations concernant l'environnement comprenaient non pas le réchauffement global mais la propreté de l'eau et de l'air, la crainte du nucléaire, la gestion de déchets toxiques, la préservation de la nature et la protection des espèces. Cette confluence des mouvements pour la conservation de la nature et la protection des citoyens contre la pollution a conduit en 1971 à la création de l'Agence pour la protection de l'environnement (EPA) aux États-Unis et, en France, du ministère de la Protection de la nature et de l'environnement, dont le nom et les prérogatives ont plusieurs fois changé depuis.

Le climat fait son entrée sur la scène politique internationale à Stockholm en 1972, lors de la première conférence mondiale sur l'environnement, organisée sous la coprésidence de René Dubos et Barbara Ward, et suivant de peu l'examen de la question de

l'« impact » des activités humaines dans deux rapports importants parus aux États-Unis¹. Quelques scientifiques avaient porté leurs regards sur ces problèmes plus tôt, mais les premiers programmes nationaux de recherche sur le *changement* climatique démarrent vers 1975², après la publication des résultats de Keeling sur la croissance rapide de la concentration atmosphérique du CO₂. En même temps commence une importante coopération internationale dans les recherches atmosphériques, orientée au départ vers l'amélioration de la prévision météorologique et la compréhension des processus du climat *présent*. Les météorologues avaient jeté les bases d'une coopération efficace bien avant, pratiquant l'échange de leurs données depuis l'établissement à Vienne en 1873 de l'Organisation internationale de la météorologie, ancêtre de l'Organisation météorologique mondiale (OMM, WMO en anglais), incorporée comme institution spécialisée dans le système des Nations unies en 1951 et sise à Genève. À partir de 1960, les satellites artificiels permettent d'observer le globe tout entier.

Une première conférence mondiale sur le climat est organisée par l'OMM à Genève en 1979. On y traite les questions scientifiques du renforcement anthropique de l'effet de serre, les conséquences d'un réchauffement pour la société dans différents domaines tels que l'agriculture, la foresterie et la santé, et finalement les politiques de développement qui pourraient s'avérer nécessaires pour réduire ces risques. C'est aussi en 1979 qu'a lieu, sous les auspices de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe, la signature de la convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance, « la première entente internationale à reconnaître à la fois les problèmes environnementaux et de santé causés par le mouvement transfrontalier... de polluants atmosphériques et le besoin pressant

de solutions régionales ». Il ne s'agissait cependant pas du changement climatique mais des émissions de SO_2 en tant que cause principale de l'augmentation des pluies acides, situation relativement simple à traiter puisque l'on pouvait établir les trajectoires qui apportaient les masses d'air polluées de la Grande-Bretagne et l'Europe centrale vers la Scandinavie. En outre, les coûts du lessivage à la cheminée ne sont pas rédhibitoires. Plusieurs protocoles traitent d'autres polluants, notamment les oxydes d'azote, l'ozone, et les composés organiques volatils, et de nombreux pays en dehors de l'Union européenne se sont associés à ces mesures. Après avoir fait une déclaration d'intention en 1980, les États-Unis et le Canada ont signé un traité bilatéral en 1991.

2. Les années 1980. – À partir de 1975, la reprise du réchauffement, l'accélération des émissions de CO_2 , et les avancées importantes dans les recherches aussi bien sur les mécanismes du climat que sur les climats du passé, ont fait prendre conscience de l'importance et de l'urgence du problème. Deux parenthèses interviennent avant le « sommet de la Terre » à Rio en 1992.

La première vient des inquiétudes sur l'ozone stratosphérique nées vers 1970 et ravivées par la découverte de la destruction accélérée de l'ozone au-dessus de l'Antarctique. Cela conduit en 1985 à la signature de la Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone. La confirmation rapide du rôle des CFC dans la formation du « trou de l'ozone » aura raison des réticences des producteurs de ces produits et aboutira à la signature du Protocole de Montréal en 1987 et à l'arrêt de leur production presque partout dans le monde. Si certains des producteurs de CFC étaient réticents, d'autres avaient prévu de les remplacer (avec les HCFC).

La seconde parenthèse apparaît dans le contexte de la guerre froide. Selon plusieurs scientifiques américains et soviétiques, dont l'Américain Carl Sagan et le Soviétique Vladimir Valentinovitch Alexandrov (disparu dans des circonstances mystérieuses en 1985), un conflit nucléaire même limité risquerait de plonger tout l'hémisphère Nord sinon tout le globe dans un « hiver nucléaire ». D'énormes masses de fumée produites par les incendies des villes et des forêts atteindraient la stratosphère, bloquant 90 % du rayonnement solaire et inaugurant une longue période de froid et d'obscurité. Le débat scientifique a été vif, et pour plusieurs chercheurs, il fallait craindre un « automne » plutôt qu'un « hiver » nucléaire, maigre consolation.

3. Les travaux du GIEC et le sommet de la Terre. Avec la médiatisation et l'inquiétude croissante d'une partie de l'opinion publique, les alertes données par les scientifiques et par un certain nombre d'organisations non gouvernementales (ONG) poussent le monde politique à prendre position au sujet du réchauffement global. En 1988, l'OMM et le PNUE établissent le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ; IPCC selon son nom anglais), qui prépare pour 1990 son premier rapport sur la science du climat, sur les impacts probables d'un changement climatique sur les activités humaines comme sur l'état de la biosphère, et sur les stratégies possibles pour mitiger ces changements ou s'y adapter. Exercice difficile : la formulation d'un consensus ne correspond pas au mode de travail des scientifiques actifs dans la recherche, pour qui le doute et la fouille des contradictions sont les moteurs de la découverte.

Le rapport du GIEC souligne l'importance des risques associés à une poursuite des émissions de gaz à effet de serre. Il provoque des réactions contrastées. Avant même la publication du rapport, l'ONG

Greenpeace sort un contre-rapport, déplorant que les scientifiques du GIEC n'aient pas toujours abondé dans le sens de la catastrophe imminente. Entre-temps, les gouvernements de la France, de la Norvège, et des Pays-Bas avaient pris l'initiative, lors d'une conférence à La Haye en 1989, de faire adopter par 24 États une déclaration sur la protection de l'atmosphère, appelant tous les États à participer à la création d'institutions pour la lutte contre le réchauffement global.

Le premier rapport du GIEC sert de base pour préparer la convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique, négociée et adoptée en 1991 à New York et signée le 12 juin 1992 par de nombreux chefs d'État, dont le président Bush (senior) des États-Unis, lors de la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement à Rio, mieux connue sous le nom de « sommet de la Terre ». Ce traité ne comporte guère de contraintes pour traduire en réalité sa déclaration d'intention : « Les mesures prises pour parer aux changements climatiques doivent être étroitement coordonnées avec le développement social et économique afin d'éviter toute incidence néfaste sur ce dernier, compte pleinement tenu des besoins prioritaires légitimes des pays en développement, à savoir une croissance économique durable et l'éradication de la pauvreté. » La convention donne comme « objectif ultime (...) de stabiliser (...) les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse ». Objectif vague mais important : il faut stabiliser les concentrations, point ne suffit de stabiliser les émissions. Cette convention sert bien de *cadre* pour les efforts qui se poursuivent au sein du GIEC (les deuxième et troisième rapports sortent en 1995 et 2001, le quatrième en 2007). On crée à Bonn un secrétariat pour la bureaucratie internationale relativement petite

ayant la responsabilité de préparer et d'examiner les inventaires nationaux d'émissions. On organise les négociations (Conférences des Parties, ou COP) pour la mise en œuvre des accords et en vue du transfert des technologies nécessaires pour que le développement des pays pauvres se fasse sans gaspillage de ressources.

II. – De Kyoto à Copenhague

Renforçant les inquiétudes soulevées pendant les années 1980 et confirmées dans son rapport de 1990, le deuxième rapport scientifique du GIEC affirme pour la première fois l'identification de l'influence des activités humaines dans le réchauffement climatique déjà observé. Mais quelques scientifiques contestent cette conclusion et certains critiquent le mode d'opération du GIEC. Les lobbies du charbon et du pétrole, ainsi que le *Wall Street Journal*, donnent un large écho à leurs propos. La politique internationale se fait nécessairement sentir au GIEC, groupe *intergouvernemental*, et les délégations des pays producteurs de pétrole font entendre leurs voix. Aux États-Unis, les lobbies du pétrole et la *Western Fuels Association* ainsi que les opposants à toute forme de régulation font pression sur l'administration Clinton et le Congrès pour qu'ils ne s'engagent pas vers une réduction même faible de la très forte consommation américaine d'énergie fossile. En Europe, les ONG et les partis « verts » ont conquis une certaine audience, mais il n'y a guère d'unanimité sur les moyens à mettre en œuvre contre le changement climatique. Les pays en voie de développement (EVD) refusent le principe d'une limitation de la croissance de leurs émissions de gaz à effet de serre, au moins tant que les quotas

d'émission sont définis en quantités absolues et non en termes des émissions par habitant. Des difficultés surgissent entre les pays du « Nord » et du « Sud » sur la pondération relative des émissions essentiellement industrielles de CO₂ et de celles de CH₄ par la riziculture et l'élevage.

C'est dans ce contexte très politique qu'a lieu la conférence de Kyoto (COP3) en décembre 1997. Il s'agit de s'engager sur des réductions *chiffrées* des émissions de GES pour 2010 par rapport aux niveaux de 1990. Les positions de départ vont de celle des petits États insulaires qui, craignant pour leur existence même dans une mer montante, réclament une réduction de 20 % *avant 2005*, à celle de l'Australie qui revendique le droit *d'augmenter* de 18 % ses émissions entre 1990 et 2010. L'Union européenne prône une réduction de 15 %. En fait, les émissions de l'Europe avaient déjà baissé entre 1990 et 1994 du fait de la fermeture des usines les moins efficaces de l'ancienne RDA incorporée en Allemagne fédérale et de celle des mines de charbon au Royaume-Uni sous le gouvernement Thatcher. Les États-Unis ont une position ambiguë, avec le Congrès à majorité républicaine hostile au principe même de régulation. Le vice-président Al Gore va à Kyoto afin de parvenir à un compromis.

L'accord obtenu, dit Protocole de Kyoto, engage *tous* les pays à œuvrer pour concilier le « développement durable » et la lutte contre le changement climatique, mais il comporte des engagements chiffrés seulement pour les pays industrialisés (parties de l'annexe I). Ces objectifs, modulés par pays, donnent une réduction globale de 5,2 % des émissions de GES pour l'ensemble de ces pays. Le Protocole prévoit la prise en compte des puits et réservoirs de carbone et prône l'utilisation accrue de sources d'énergie renouvelables. Il prévoit un commerce de droits d'émissions et

d'autres arrangements entre « Nord » et « Sud » (mécanismes de développement propre).

L'Union européenne (à 15) s'engage sur une réduction de 8 %, objectif auquel se rallient certains pays de l'ancien bloc soviétique (dits en voie de transition vers l'économie de marché, ou TEM), dont certains sont par la suite rentrés dans l'UE. La Russie et l'Ukraine, au contraire, ne prennent qu'un engagement d'augmentation zéro par rapport à 1990. Comme en fait les émissions de ces pays avaient baissé de 15 à 40 % entre 1990 et 1995, cela représente un capital important de droits d'émission négociables. Les États-Unis ont accepté un objectif de 7 % de réduction pour 2010, objectif qu'ils auraient eu beaucoup de mal à respecter même avec une volonté politique dans ce sens. L'Australie, l'Islande et la Norvège ne se sont engagés qu'à *limiter l'augmentation* de leurs émissions. Les pays en développement (annexe II) n'ont pris *aucun* engagement. En 2008, la Chine devient le premier émetteur de GES dans le monde, mais ses émissions par habitant restent faibles comparées à celles de l'Europe et de l'Amérique du Nord.

La conférence de Kyoto a été suivie par des négociations difficiles pour préciser les mécanismes de mise en œuvre du protocole. Aux États-Unis, l'administration Clinton-Gore n'a jamais osé proposer la ratification du Protocole au Congrès, où la majorité républicaine est restée hostile. Arrivé à la fin de l'année 2000 à la présidence des États-Unis, George W. Bush décide de *retirer la signature* des États-Unis du protocole. Le président Bush avait cherché à justifier sa décision de retirer les États-Unis du processus de Kyoto en arguant que les rapports du GIEC ne constituaient pas une base scientifique fiable pour de tels engagements. L'évaluation qu'il a demandée à l'Académie des sciences des États-Unis³ a pourtant confirmé le bien-fondé des inquiétudes sur le renforcement

anthropique de l'effet de serre, auquel les États-Unis contribuaient pour près de 25 % en 2000. Il était de toute façon clair que ni l'administration Bush-Cheney ni le Congrès à majorité républicaine ne souhaitaient engager les États-Unis dans un processus de réglementation internationale, surtout en l'absence d'engagements du côté des pays du Sud. Par la suite, l'administration Bush a plusieurs fois tenté de censurer les scientifiques américains (notamment Jim Hansen de la NASA) qui soulignaient les dangers du réchauffement, ainsi que les rapports de différentes agences américaines, en particulier celle (EPA) de protection de l'environnement.

Dans l'ensemble, le Protocole de Kyoto a été un échec. Depuis 1990, la faible réduction des émissions de GES dans les pays industrialisés est venue surtout de l'effondrement du système soviétique. Il faut – à mes yeux – attribuer cet échec d'abord aux États-Unis, à l'incapacité de l'administration Clinton-Gore de faire ratifier l'accord et au refus de l'administration Bush-Cheney de voir la réalité scientifique et d'accepter que les intérêts des habitants de la planète – dont les Américains – doivent primer sur ceux des marchands du pétrole. Pourtant, s'ils avaient cherché à appliquer Kyoto, les États-Unis auraient pu jouer un rôle de leader dans le développement de nouvelles technologies et de nouvelles industries autour des économies d'énergie.

Contrainte d'admettre – du bout des lèvres – la réalité du problème, l'administration Bush a accepté de participer en 2005 aux discussions de Montréal sur l'après-Kyoto, mais dans le cadre de la Convention-cadre de l'ONU plutôt que dans celui du Protocole. En même temps, plusieurs États – dont la Californie – ont reconnu l'urgence de réduire les émissions des GES et ont légiféré dans ce sens. De même, de nombreux industriels américains comme

européens – même dans le secteur du pétrole – ont pris leurs distances par rapport à ceux qui persistent dans le déni de la menace.

Et à la suite de la finalisation du 4^e rapport du GIEC et lors de la réunion de Bali fin 2007, les délégations encore plutôt réticentes des États-Unis, du Canada et du Japon ont finalement accepté la nécessité d'aller rapidement vers une réduction significative des émissions de GES au cours des prochaines décennies.

III. – De Copenhague à l'Accord de Paris

Pourtant, en 2009, malgré une nouvelle administration américaine autour d'un président démocrate, Barack Obama, reconnaissant l'urgence de l'action climatique, le sommet de Copenhague s'est achevé dans la confusion et l'échec. L'UE avait pourtant présenté en 2008 un « paquet climat-énergie » fixant des objectifs ambitieux et contraignants tels que de réduire de 20 % les émissions (par rapport au niveau de 1990) et d'atteindre d'ici 2020 une part de 20 % d'énergies renouvelables. Mais elle a été marginalisée par les États-Unis et surtout par la Chine, soutenue par les autres nations membres des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud). Malgré l'échec de Copenhague, l'UE a poursuivi ses efforts, en matière de législation environnementale comme de diplomatie climatique, retrouvant une position de leader lors des COP suivantes. Cela inclut le sommet de Durban en 2011, où l'UE a joué un rôle crucial dans la négociation de la « plateforme de Durban », dont les lignes directrices vont aboutir à l'Accord de Paris de 2015, nouvel accord global sur le climat impliquant les États-Unis d'Obama, les BRICS et les pays en voie de développement.

La France, pays-hôte de la COP21 en 2015, déterminée à ne pas répéter les erreurs de Copenhague, a su lors de la Conférence de Paris établir une structure de gouvernance climatique mondiale signée par 195 pays grâce à l'appui de ses partenaires européens. L'UE a bien joué un rôle de médiateur, contribuant à construire des ponts entre les besoins de développement des pays du Sud et les exigences climatiques plus rigoureuses de certains pays du Nord. Par exemple, l'UE a commencé la conférence en annonçant une stratégie commune avec 79 pays d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique (ACP), et les délégués européens ont joué un rôle de premier plan dans la construction d'une « coalition de haute ambition » impliquant les États-Unis. Cette coalition a réussi à obtenir l'adoption d'un engagement pour limiter l'augmentation des températures moyennes mondiales à 2 °C au cours de ce siècle. La COP21 a également obtenu l'établissement d'un nouveau « cadre de transparence » dont l'objectif est d'examiner les contributions nationales de toutes les parties, avec des variations subtiles concernant les efforts attendus entre les pays développés et les pays en développement. L'année 2023 a été choisie pour la première « plateforme mondiale » quinquennale, destinée à apprécier l'adéquation des efforts nationaux, qui seront régulièrement mis à jour et améliorés au cours du processus.

IV. – Perspectives

1. **Un développement durable ?** – Même si les pays industrialisés devaient tenir leurs engagements, cela ne résoudrait pas le problème. En effet, la croissance de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre dépend du *total* des

émissions, où qu'elles aient lieu sur le globe. Et si les émissions mondiales continuent d'augmenter (ou même de rester constantes) au cours des prochaines décennies, cela nous conduit inéluctablement à l'accélération des changements climatiques avec l'accumulation des GES dans l'atmosphère. En outre, compte tenu du temps de résidence du CO₂ dans l'atmosphère, cette accumulation va perdurer pendant des siècles même après la réduction des émissions. Pour éviter des changements dangereux (dès 1,5 °C d'augmentation selon le dernier rapport du GIEC paru en 2018), il faudra stabiliser la teneur atmosphérique en GES à un niveau équivalent ou inférieur à 550 ppm de CO₂. Or, pour cela, il faut que les pays riches commencent *tout de suite* à réduire leurs émissions de GES pour arriver à 75 % de réduction d'ici 2050 ; et que les autres pays – et notamment les pays émergents où pourtant les émissions par habitant sont encore très inférieures aux nôtres – commencent à réduire leurs émissions dès 2020. Les émissions par habitant y seraient encore bien inférieures à celles des pays riches aujourd'hui. De plus, de nombreux spécialistes estiment qu'il faut assez rapidement retourner aux 350 ppm de 1988 (voir Jim Hansen : www.350.org).

Et pourtant, on ne peut penser interdire aux pauvres du monde d'aspirer à une élévation de leur niveau de vie. Si celle-ci passe par une consommation accrue de carburants fossiles, surtout du charbon (ce qui est le cas en Chine et en Inde), comment éviter une augmentation des émissions de CO₂ ? De plus, même sans poursuite de la croissance démographique, comment éviter que la consommation accrue de viande d'une part, la lutte contre la malnutrition d'autre part, ne conduisent à une augmentation des émissions de méthane, autre GES dont il faut tenir compte dans le budget carbone ? Dans le passé, les pays du Sud ont refusé toute

contrainte sur la croissance de leurs émissions de GES, compte tenu du fait que leurs émissions *par habitant* n'atteignent que la moitié, voire le tiers, le quart ou encore moins, de celles produites en Europe occidentale ou au Japon, sans évoquer la gabegie courant en Amérique du Nord ou autrefois dans le bloc soviétique. Il peut donc paraître impossible, au moins sur la base de carburants fossiles, de parvenir à un monde équitable sans au moins *doubler* le taux mondial d'émissions de GES, et cela même si les États-Unis, le Canada et l'Australie réduisent leurs émissions par habitant de moitié pour les ramener aux niveaux européens ou japonais.

Situation sans espoir ? En fait, il existe d'énormes disparités dans le rapport entre le CO₂ émis (et donc les ressources fossiles consommées) et les biens produits, que l'on mesure par l'intensité carbonique de la production de richesse. Dans le monde américano-australien, on génère plus de 600 kg de CO₂ pour un millier de dollars de PIB, là où le Japon et les pays riches de l'Union européenne génèrent moins de 400 kg. Si elle détermine les bénéfices des rentiers du sous-sol qui vendent le charbon et le pétrole, la quantité brûlée ne mesure pas la productivité d'une économie moderne. À ce titre, les champions du gaspillage furent non pas les États-Unis mais les pays industrialisés de l'ancien bloc soviétique, émettant quelques *tonnes* de CO₂ pour produire les mêmes biens. Aujourd'hui, la plus grande gabegie trône dans de nombreux pays producteurs de pétrole, au Moyen-Orient ou ailleurs, où l'on laisse le méthane s'échapper ou brûler dans les torchères en pure perte, alors qu'on peut l'exploiter, comme pour le gaz algérien liquéfié et exporté en France. Le développement, la modernisation et le marché peuvent conduire à une réduction de ce rapport d'inefficacité qu'est l'intensité carbonique. On sait qu'avec une population énorme et une économie en croissance rapide, les

émissions de CO₂ de la Chine dépassent désormais celles des États-Unis, mais entre 1990 et 1996 l'intensité carbonique de la production chinoise a diminué de 40 %. Toutefois, la poursuite de cette tendance n'est pas garantie, ni en Chine ni ailleurs, même si on le proclame comme objectif.

Autre facteur d'inquiétude, les progrès techniques des deux dernières décennies ont provoqué une véritable révolution énergétique : les techniques d'extraction permettent aujourd'hui d'exploiter d'immenses réserves de pétrole et de gaz naturel (de schiste), jusque-là inatteignables. Aux États-Unis, cette révolution énergétique a fait du pays le premier producteur d'hydrocarbures : ainsi, de 2008 à 2018, la production américaine de gaz naturel a augmenté de 50 %, celle de pétrole de quasi 100 %, et le pays est devenu le premier producteur mondial de gaz, et sans doute de pétrole, en 2018. Si l'on parlait encore au milieu des années 2000 de pic pétrolier, il n'en est plus guère question aujourd'hui. Et cette « révolution » pourrait s'étendre à de nombreux autres territoires de la planète, où les compagnies pétrolières prospectent en quête de nouveaux gisements désormais exploitables. Cette évolution qui prolonge le temps de l'énergie bon marché est peu propice aux économies d'énergie et à une croissance réimaginée.

En outre, le retrait américain de l'Accord de Paris, décidé par le président Donald Trump (qui conteste également la réalité du changement climatique et son origine humaine), pourrait avoir des effets d'entraînement sur d'autres pays du monde, comme on a déjà pu le voir à la fin de l'année 2018 lors du sommet du G20 de Buenos Aires et à la COP24 de Katowice (Pologne). En ce qui concerne la COP24, il est particulièrement inquiétant de voir les États-Unis, la Russie ou encore l'Arabie saoudite remettre en question le dernier rapport des scientifiques du GIEC. De plus, les élections

présidentielles de 2018 au Brésil et l'annulation de l'organisation de la COP25 par ce pays montrent combien les engagements non juridiquement contraignants de l'Accord de Paris demeurent fragiles. Certes, la Chine a repris le leadership délaissé par les États-Unis et s'est positionnée en leader des énergies renouvelables. Mais le développement des infrastructures nécessaires à l'exploitation des énergies solaires et éoliennes pose des problèmes environnementaux (production des métaux rares), et émet également des GES.

Les États-Unis ne sont pas les seuls à ne pas respecter leurs engagements climatiques : on pourrait également citer le Canada, le Brésil, la France... Le cadre multilatéral mis en place par l'Accord de Paris semble se fissurer, alors même que le changement climatique s'accélère. Les pays qui se sont véritablement engagés dans la transition écologique ne peuvent compenser par leurs baisses d'émissions celles de ceux qui sont sortis de l'Accord ou ne le respectent pas.

Surtout, il est clair que le facteur principal n'est pas tant la croissance démographique, mais la croissance de la richesse sans changement radical de mode de production de cette richesse. Déjà en 1997, le rapport « facteur quatre » du Club de Rome (Weizsäcker *et alii*) soutient qu'avec des technologies qui existent, on peut produire deux fois plus de biens avec deux fois moins de ressources. Cela laisse-t-il entrevoir la possibilité d'un niveau de vie décent partout dans le monde ? Avec une population mondiale plafonnée à sept milliards (chiffre déjà dépassé !), limiter les émissions à 30 000 millions de tonnes en équivalent CO₂ (MtéqCO₂) de GES par an (10 % de moins que le niveau de 1990) correspond à moins de 5 téqCO₂ (1,5 téqC) par personne. Il faudrait pour cela améliorer, surtout dans les pays pauvres, l'efficacité de l'utilisation

de l'énergie. Il faudrait aussi diminuer les émissions de méthane associées à l'agriculture et à l'élevage, en partie peut-être en l'utilisant comme carburant. Un développement durable ? *Non*. Pour éviter la « zone de danger », il faudrait diminuer les émissions mondiales de près de 60 % par rapport au niveau de 2007, et cela *avant 2050*.

De telles réductions des émissions coûteront-elles trop cher ? Trop cher par rapport à quoi ? Le rapport de sir Nicholas Stern, publié à Londres en 2006, tend à montrer que les coûts de la transition vers un système économique à faibles émissions restent gérables (1 % du produit mondial brut) comparés aux coûts sociaux et économiques du changement climatique rapide. Certes, le rapport Stern est contesté par certains économistes, mais d'autres abondent dans son sens, tout comme le rapport (2007) du 3^e groupe de travail (stratégies de « mitigation ») du GIEC, ainsi que le rapport sur le développement de la Banque Mondiale publié en 2009. Certains spécialistes soulignent que, globalement, passer vers une économie à faibles émissions de carbone entraîne des bénéfices et non des coûts ; mais la transition prendra du temps, nécessitera d'importants investissements et dépendra en partie de nouveaux acteurs économiques ayant aujourd'hui moins d'influence que les lobbies du pétrole, du charbon et de l'automobile. En Europe, les politiques parlent d'un facteur 4, mais il ne suffit pas de parler, il faut faire. Si en France les dernières années ont vu une réduction des émissions de GES dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie et de l'agriculture, ces émissions continuent d'augmenter dans les secteurs des transports, de l'habitat et du tertiaire. Dans nos pays riches et vieux, une partie de la solution viendra peut-être de l'adoption de nouveaux modes de vie des nouvelles générations qui savent qu'elles auront à affronter le changement climatique ; mais

dans les pays émergents, dans les pays encore pauvres qui ont hâte d'émerger ?

En outre, même dans un pays riche comme la France, où la production d'électricité fait très peu appel au carbone, instaurer une taxe supplémentaire sur les carburants des automobiles provoque de fortes résistances, comme en novembre 2018. Cela illustre bien l'intrication de ces problématiques intimement liées – climat et niveau de vie – qui touchent toutes les deux aux conditions d'une survie durable de l'humanité. Dès lors, la seule solution passe par une transition écologique qui reverrait entièrement jusqu'à la notion de croissance⁴. Pouvons-nous, avons-nous le temps d'imaginer un nouveau modèle économique reposant cette fois sur un principe de sobriété ? La sobriété vise dans une large mesure les consommations énergétiques peu utiles, voire complètement inutiles, au regard du bien-être collectif et individuel, et pourtant si nombreuses dans les pays industrialisés – du chauffage des terrasses aux écrans publicitaires qui ne cessent de se multiplier... De manière plus structurelle, le principe de sobriété nécessitera une intervention étatique pour repenser l'aménagement du territoire, une réflexion également essentielle pour réduire les inégalités d'accès aux réseaux et services publics. Urgence climatique et justice sociale doivent être liées, mais intelligemment, pour répondre également à la crise contemporaine du politique qui se manifeste par les poussées du populisme partout dans le monde. La remise en question de la mondialisation économique pourra être salutaire si les politiques l'utilisent pour transformer un système économique qui mène l'humanité à la catastrophe climatique et écologique. Le dernier rapport du GIEC propose d'ailleurs des solutions concrètes dans quatre domaines déterminants : énergie, utilisation des sols et écosystèmes, villes et infrastructures, industrie. Un résumé exécutif

spécifique destiné aux décideurs urbains souligne en particulier qu'on ne pourra sauver la planète sans modifier en profondeur la manière dont les citoyens vivent, travaillent et se déplacent, mettant ainsi l'accent sur l'importance d'acteurs autres qu'étatiques⁵.

2. Ingénierie de la planète ? – La stabilisation de la composition atmosphérique exige que les émissions anthropiques de GES soient très fortement réduites ou qu'elles soient compensées par des « puits » naturels et anthropiques. Peut-on remplacer totalement l'utilisation des carburants fossiles par une combinaison d'énergie nucléaire et d'énergies renouvelables ? Du côté des renouvelables, les agro-carburants représentent-ils une solution ? Et cela, sans empiéter sur les terres nécessaires pour l'alimentation, et les dernières forêts qui restent dans l'état de nature ? Ou faut-il envisager de « séquestrer » – c'est-à-dire de mettre sous terre – quelques dizaines de milliards de tonnes de GES chaque année ? Où, comment, et jusqu'à quand ? Les carburants fossiles que nous brûlons en quelques siècles représentent l'accumulation de millions d'années de séquestration naturelle dans le sous-sol. Peut-on sérieusement envisager de multiplier ce taux d'accumulation par un facteur 10 000 ou plus ? La photosynthèse fonctionne sur la base de lumière solaire, du CO₂ et de l'eau, mais le besoin d'autres nutriments limite la possibilité de faire pousser des forêts pour ensuite les récolter et les ensevelir au rythme de dizaines de milliards de tonnes par an. On trouvera sans doute d'autres possibilités de puits pour compenser des émissions anthropiques réduites, mais non nulles, et stabiliser la composition atmosphérique. Mais quand, et à quel niveau de GES ? Pouvons-nous limiter leur concentration à l'équivalent de 500 ppm de CO₂ ou sommes-nous condamnés à accepter 600 ou plus ? Si nous continuons pendant

plusieurs décennies encore – un instant dans la vie de la Terre, une éternité pour les politiques – à ajouter de plus en plus de GES à l'atmosphère, il est possible que les impacts des changements climatiques rapides sur l'agriculture et la biosphère nous entraînent dans des désastres écologiques, économiques et démographiques faisant alors chuter catastrophiquement vers zéro les émissions.

Comment faire en respectant ce que l'on appelle le « principe de précaution » ? Comment peser le certain, le probable et l'improbable, savoir rejeter les fantasmes sans pour autant écarter les éventualités que nous estimons peu probables mais totalement inacceptables ? Pour beaucoup d'observateurs, la production d'électricité par le nucléaire limite les émissions de GES et doit être encouragée. Mais d'autres, surtout parmi les écologistes, estiment que la catastrophe de Tchernobyl (1986), qui date pourtant du système soviéto-militaire, reste une éventualité inacceptable encore possible dans le monde actuel et futur.

Certains pensent que plutôt que de chercher à limiter les émissions de GES ou à les retirer de l'atmosphère, il faut chercher à compenser l'intensification de l'effet de serre par un renforcement anthropique de l'effet parasol. On peut imaginer augmenter l'albédo planétaire α de telle façon que la température moyenne à la surface du globe ne change pas malgré l'augmentation anthropique du facteur effet de serre g . Suffirait-il d'introduire des particules réfléchissantes dans la stratosphère ? Même si ça ne coûtait pas cher, cela resterait une vue de l'esprit, car les climats dans lesquels nous vivons ne se résument pas à la température moyenne, et même avec une compensation globale exacte, il y aurait des changements majeurs en fonction du lieu et de la saison. Pouvons-nous penser maîtriser ces changements ? Agir à partir d'un territoire national affecte le monde entier. En outre, il faudrait renforcer

indéfiniment ce type d'action si on le prend comme excuse pour continuer à enrichir l'atmosphère en GES. Un acteur national peut-il les justifier ? En modifiant la composition de l'atmosphère, on touche à tout – températures, cycle de l'eau, répartition des risques de tempêtes et de sécheresses... Certains ont toujours rêvé de maîtriser la nature, d'empêcher les ravages des tornades, de détourner les ouragans, d'arroser les terres asséchées... et d'empêcher le retour des glaces attendu dans quelques millénaires. Même si jusqu'ici les faiseurs de pluie vendent surtout du vent, nous ne pouvons exclure la *possibilité* de contrôler un jour, au moins en partie, les violences du ciel. Pouvons-nous imaginer de maîtriser les climats ? Aux États-Unis, les républicains qui ne peuvent plus nier la réalité du changement climatique, même si nombre d'entre eux continuent à en contester l'origine humaine, préfèrent croire à cette possibilité, quitte à jouer aux apprentis-sorcières avec la survie de l'espèce, plutôt que d'envisager de remettre en cause leur modèle de croissance ou, pire (pour eux), de porter atteinte aux intérêts des groupes pétroliers et de leurs puissants lobbies. Les risques pour la biodiversité sont pourtant peu calculés avec ces outils, souvent comparés avec l'édition du génome humain. Le caractère irréversible et le détournement potentiel de certains types de géo-ingénierie pour des visées de domination économique et/ou militaire soulèvent évidemment beaucoup de questions. L'un des champions de ce projet à l'échelle mondiale, David Keith, soutient toutefois que des recherches doivent être menées sur ces sujets afin de pouvoir évaluer plus précisément le rapport bénéfices/risques, les coûts et la faisabilité de ces outils controversés.

Aujourd'hui, nous n'en sommes pas là. L'homme altère l'atmosphère et la surface de la planète, sans pouvoir appréhender tout ce qui en découlera. Toutefois, pour la première fois dans

l'histoire de la vie sur cette planète, une espèce – *homo sapiens* – s'interroge sur les conséquences de ses actions sur son environnement. Cette interrogation peut-elle se traduire en rétroaction de l'intelligence, permettant à cette espèce d'éviter des avenir indésirables où l'entraîneraient ses activités irréfléchies ? La réponse n'est pas claire.

Remerciements

Je ne peux indiquer ici les noms des nombreuses personnes – aussi bien jeunes étudiants que membres de l'Académie des Sciences – grâce auxquelles j'ai pu me tourner vers la physique du climat et faire quelques contributions à ce que l'on sait là-dessus. Je tiens cependant à remercier ici celles qui m'ont aidé dans la mise à jour de cette dernière édition de mon *Réchauffement climatique*. Il s'agit d'une part de ma fille Maya Kandel, historienne spécialiste des États-Unis et des relations internationales, d'autre part de Mounia Mostefaoui, chercheuse en physique de l'atmosphère.

Bibliographie

Ouvrages et articles (en français et en anglais)

Acot P., *Histoire du climat*, Paris, Perrin, 2003.

Allègre C., *Économiser la planète*, Paris, Fayard, 1990.

Bengtsson L. *et alii* (éd.), *Observing and Modeling Earth's Energy Flows, Surveys in Geophysics*, vol. 33, n^{os} 3-4, 2012.

Berger A., *Les Climats de la Terre*, Bruxelles, De Boeck Université, 1992.

Betts R.A. *et alii*, « Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5 °C and 2 °C global warming with a higher-resolution global climate model », *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.*, 2018.

Bontems P., Rotillon G., *Économie de l'environnement*, Paris, La Découverte, 1998.

Burroughs W. J., *Does the Weather Really Matter ? The Social Implications of Climate Change*, Cambridge (UK), Cambridge Univ. Press, 1997.

- Calisesi Y., Bonnet R.-M. *et alii* (éd.), *Solar Variability and Planetary Climates*, *Space Science Reviews*, vol. 125, n^{os} 1-4, 2006.
- Canadell J.G. *et alii*, « Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity and efficiency of natural sinks », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 104, n° 47, 2007.
- Cox J.D., *Climate crash. Abrupt climate change and what it means for our future*, Washington, Joseph Henry Press, 2005.
- Crowley T. G., « Causes of climate change over the past 1 000 years », *Science*, vol. 289, n° 5477, 2000, p. 270-277.
- Dagorne A., Dars R., *Les Risques naturels*, Paris, Puf, « Que sais-je ? », n° 3533, 2^e éd., 2001.
- Deneux M. (sénateur), *L'Évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques (OPECST), Assemblée nationale n° 3603, Sénat n° 224, Paris, 2002.
- Duplessy J.-C., *Quand l'océan se fâche. Histoire naturelle du climat*, Paris, Odile Jacob, 1996.
- Duplessy J.-C., Morel P., *Gros temps sur la planète*, Paris, Odile Jacob, 2000.
- Emanuel K *et alii*, « Radiative-Convective Instability », *J. Adv. Model. Earth Sys.*, vol. 6, 2013.
- , « Supplement to A Statistical Deterministic Approach to Hurricane Risk Assessment », *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 87, 2006.
- Fellous J.-L., *Avis de tempêtes. La nouvelle donne climatique*, Paris, Odile Jacob, 2003.

- Fellous J.-L., Gautier C., *Comprendre le changement climatique*, Paris, Odile Jacob, 2007.
- Foukal P. *et alii*, « Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate », *Nature*, vol. 443, 2006, p. 161-166.
- Grübler A., « Trends in Global Emissions : Carbon, Sulfur, and Nitrogen », *Encyclopedia of Global Environmental Change*, vol. 3, 2002, p. 35-53.
- Hansen J. *et alii*, « Earth's energy imbalance : Confirmation and implications », *Science*, vol. 308, 1431-1435, 2005.
- Hartmann D.L., *Global physical climatology*, San Diego, Academic Press, 1994.
- IPCC, *Global Warming of 1,5 °C*, IPCC Special Report, World Meteorological Organization, Genève, 2018.
- Jollivet M. (éd.), *Le Développement durable, de l'utopie au concept*, Paris, Elsevier, 2001.
- Jancovici J.-M., *L'Avenir climatique*, Paris, Seuil, 2005.
- Joussaume S., *Climat d'hier à demain*, Paris, Éd. CNRS/CEA, 1999.
- Kandel R., *Les Eaux du ciel*, Paris, Hachette, 1998. Mise à jour en anglais, *Water from Heaven*, New York, Columbia Univ. Press, 2006.
- , *L'Incertitude des climats*, Paris, Hachette, 1998.
- , « Les Modèles météorologiques et climatiques », in P. Nouvel (éd.), *Enquête sur le concept de modèle*, Paris, Puf, « Science, histoire et société », 2002, p. 67-98.
- Kandel R., Kandel M., *La Catastrophe climatique*, Paris, Hachette, 2009
- Keith D.W. *et alii*, « Solar geoengineering reduces atmospheric carbon burden », *Nature Climate Change*, vol. 7, 2017, p. 617-

619.

Kempf H., *Comment les riches détruisent la planète*. Paris, Seuil, 2007.

Klimont Z. *et alii*, « The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide : 2000-2011 emissions », *Environmental Research Letters*, vol. 8, n° 1, 2013.

Labeyrie J., *L'Homme et le Climat*, Paris, Denoël, 1993.

Lambert G., *L'Air de notre temps*, Paris, Seuil, 1995.

Lean J., « Living with a variable Sun », *Physics Today*, vol. 58, n° 6, 2005, p. 32-38.

Le Roy Ladurie E., *Histoire du climat depuis l'an mil*, Paris, Flammarion, 1967.

–, *Histoire humaine et comparée du climat*, 3 tomes, Paris, Fayard, 2004-2009.

Lorius C., *Les Glaces de l'Antarctique, une mémoire, des passions*, Paris, Odile Jacob, 1991.

Lovelock J., *The vanishing face of Gaïa. A final warning*, New York, Basic Books, 2009.

MacCracken M.C., Moore F., Topping J.C. Jr. (éd.), *Sudden and disruptive climate change*, Londres, Earthscan, 2008.

Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., *Halte à la croissance ?*, trad. J. Delaunay, Paris, Fayard, 1972.

Mégie G., *Ozone, l'équilibre rompu*, Paris, Éd. CNRS, 1989.

Orsenna E., Petit M. (présenté par), *Climat. Une Planète et des Hommes*. Paris, Cherche-Midi, 2011.

Pachauri R.K., Reisinger A. (éd.), *Climate Change 2007. Synthesis Report*, Cambridge (UK), Cambridge Univ. Press, 2007.

- Petit J.R. *et alii*, « Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica », *Nature*, vol. 399, 1999, p. 429-443.
- Rind D., « The Sun's role in climate variations », *Science*, vol. 296, n° 5568, 2002, p. 673-677.
- Schneider S.H., *La Terre menacée. Un laboratoire à risques*, trad. J.-P. Ricard, Paris, Hachette, 1999.
- Soden B.J. *et alii*, « Global cooling after the eruption of Mount Pinatubo : A test of climate feedback by water vapor », *Science*, vol. 296, n° 5568, 2002, p. 727-730.
- Tubiana L., Dessus B., « Le climat, risque majeur et enjeu politique », *Courrier de la Planète. Cahiers de Global Chance*, Paris, mars-avril 1998.
- Vernier J., *L'Environnement*, Paris, Puf, « Que sais-je ? », n° 2667, 5^e éd., 2001.
- Wagner G., Weitzman M., *Climate Shock*, Princeton University Press, 2015.
- Watson R.T. *et alii*, *Climate Change 2001. Synthesis Report* (synthèse du 3^e rapport du GIEC), Cambridge (UK), Cambridge Univ. Press, 2002.
- Weizsäcker E.U. von, Lovins A.B., Lovins L.H., *Facteur 4. Deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources*, trad. P. Bertrand, Mens, Terre vivante, 1997.
- Wise M. *et alii*, « Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy », *Science*, vol. 324, 2009, p. 1183-1186.

Sites internet (au moins partiellement en français)

www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/ (CNRS, France).

www.ec.gc.ca (Environnement Canada).

www.eea.europa.eu (Agence européenne de l'environnement).

www.futura-sciences.fr

www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/

www.ipcc.ch (GIEC).

<https://keith.seas.harvard.edu/news>

<https://nca2018.globalchange.gov/>

www.unfccc.de (secrétariat, Convention-cadre de l'ONU sur les changements climatiques).

www.wmo.ch (Organisation météorologique mondiale).

<http://www.ademe.fr> (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

www.assemblee-nationale.fr/12/rap-info/i3021-tl.asp (Rapport de la Mission d'information sur l'effet de serre de l'Assemblée nationale).

www.chooseclimate.org (pour ceux qui veulent « jouer » avec le climat à l'aide d'un programme interactif de modélisation en langage Java).

www.realclimate.org (surtout en anglais, parfois en français : « blog » de scientifiques du climat).

Table des figures

- 1 Les projections du GIEC
- 2 Évolution des concentrations atmosphériques de deux gaz à effet de serre (GES)
- 3 Émissions anthropiques de SO₂
- 4 Quatre grands cycles climatiques de Vostok
- 5 Transformation de l'énergie solaire
- 6 Spectre infrarouge de la Terre
- 7 Le cycle de l'eau
- 8 Structure verticale de l'atmosphère terrestre
- 9 Le réchauffement global : anomalies de la température moyenne à la surface du globe
- 10 Répartition géographique moyenne pour le réchauffement

TABLE DES MATIÈRES

Introduction

I. – Le réchauffement climatique, le problème du xxi^e siècle ?

II. – Réalités et risques

III. – Le climat et la politique

Chapitre premier - La transformation de l'atmosphère planétaire

I. – La mesure du changement

II. – Entre le passé et l'avenir

Chapitre II - L'atmosphère contrôle le climat

I. – La transformation du flux radiatif solaire

II. – Le forçage du changement

III. – Les éléments de complexité

IV. – Vers la simulation de la Terre ?

Chapitre III - La climatologie entre passé, présent et futur

I. – Climats et changement climatique

II. – Des observations locales vers la moyenne globale, la réalité du réchauffement

III. – Évolution des techniques de mesure

IV. – La recherche des climats passés

V. – Les risques climatiques du xxi^e siècle

Conclusion - Le climat et la politique

I. – Historique de la politique du climat

II. – De Kyoto à Copenhague

III. – De Copenhague à l'Accord de Paris

IV. – Perspectives

Remerciements

Bibliographie

Table des figures



www.quesaisje.com



1. Pour les émissions plus récentes, voir Z. Klimont *et alii*, « The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide : 2000-2011 emissions », *Environmental Research Letters*, vol. 8, n^o 1, 2013.

2. *Ibid*

1. Les calculs indiquent que, si jamais la Terre avait été complètement couverte de glace fortement réfléchissante, elle n'aurait jamais pu assez se réchauffer pour s'en débarrasser. Toutefois, des géologues ont relevé des indices de glaciation à basse altitude proche de l'équateur, il y a 2,2 milliards d'années. Pour mettre fin à cet état de Terre « boule de neige » (au moins sur les continents), il a fallu une période d'activité volcanique prolongée augmentant fortement le CO₂ atmosphérique et l'effet de serre.

2. Dans certains MCG, on emploie une représentation en harmoniques sphériques à la place d'une grille.

-
1. *Reconciling Observations of Global Temperature Change*, Washington, National Academy Press, 2000.
 2. La résolution de la polémique est décrite en détail dans le chapitre 3 du 4^e rapport (WG1) du GIEC (2007), accessible sur le site www.ipcc.ch.

-
1. *Man's Impact on the Global Environment*, Study of critical environmental problems (SCEP), MIT Press, 1970 ; *Inadvertent Climate Modification*, Study of man's impact on climate (SMIC), MIT Press, 1971.
 2. En France, la Délégation générale à la recherche scientifique et technique, dépendant du Premier ministre, a lancé une « Action de soutien programmé » sur l'évolution des climats en 1977, action transformée par la suite en Programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC). La Commission européenne lance un programme de recherches sur la climatologie et les risques naturels.
 3. *Climate Change Science : An Analysis of Some Key Questions*, Washington, National Academy Press, 2001.
 4. J. Bueb, « Quelle transition écologique souhaitons-nous ? », *Diploweb*, 18 novembre 2018.
 5. IPCC, *Summary for Urban Policy Makers. What the IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C Means for Cities*, décembre 2018.